

Durabilidad de concretos de media y alta resistencia en ambientes marinos simulados

Tesis de Maestría presentada a la Universidad del Norte como requisito
parcial para la obtención del título de Maestría en Ingeniería Civil con énfasis
en Estructuras

Autor

Diego Alfonso Rada Altahona
Ingeniero Civil – Universidad del Norte

Director

Margareth Josefina Dugarte Coll
Ingeniera Civil, PhD.

Co-tutor

Andrés Guzmán Guerrero
Ingeniero Civil, PhD.

Barranquilla, Atlántico

JULIO DE 2018

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en primer lugar a Dios, por haberme permitido culminar esta etapa, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad, y por brindarme una vida llena de aprendizajes y experiencias. Gracias Dios por tu infinita bondad y amor.

A Colciencias, por darme la oportunidad económica de realizar mis estudios de Maestría y de esta manera crecer como profesional.

A la Universidad del Norte, por confiar en mí, abrirme nuevamente las puertas y permitirme realizar todo el proceso investigativo dentro de esta alma máter.

A mi madre, por ser el pilar más importante. Porque a través de su trabajo y sacrificio todos estos años, me ha demostrado siempre su cariño. Gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía.

A mi directora de tesis, la Ingeniera Margareth Dugarte, por su decisivo apoyo en este proceso y por haber compartido conmigo sus conocimientos.

A la Ingeniera María Alejandra Albis, por creer siempre en mí y por haberme brindado el apoyo para desarrollarme profesionalmente.

Al Ingeniero Pedro Therán Cabello (Q.E.P.D.) por haber depositado su confianza en mí para liderar la ejecución de proyectos que han servido como base actual de mi experiencia profesional.

A mi esposa, por su apoyo incondicional, por su comprensión y sobre todo por su paciencia en todo este camino.

A toda mi familia porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona. Porque de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.

Finalmente quiero agradecer el apoyo a todas las personas especiales que me acompañaron en esta etapa, aportando a mi formación académica y profesional.

¡A todos, Gracias!

RESUMEN EJECUTIVO

El concreto reforzado compuesto por concreto y barras de acero como su nombre lo indica, es uno de los materiales de construcción de mayor uso en el mundo, sin embargo, el uso de este material viene ligado a la susceptibilidad de sufrir problemas de corrosión en el acero que lo compone. Estos problemas tienen implicaciones económicas ya que podría verse afectada toda la matriz que protege este acero, dando lugar a poner en riesgo la integridad de la estructura causando agrietamientos. A partir de lo anterior, surge la necesidad de evaluar las estructuras de concreto reforzado en términos de estado y vida de servicio remanente.

Los concretos empleados para las estructuras están clasificados en términos de resistencia mecánica, es decir, hay concretos de baja, media y alta resistencia, la cual viene relacionada directamente con la densidad, los vacíos y la absorción.

Para poder predecir la vida útil de una estructura de concreto reforzado, se hace necesario conocer a qué velocidad se está dando el proceso de corrosión, esto con el fin de realizar las intervenciones necesarias para extender la vida útil de la estructura evaluada. Es por ello que se vuelve importante analizar en términos de durabilidad el concreto reforzado, puesto que es muy útil para diagnosticar el estado de la estructura debido al proceso de corrosión y así tomar medidas pertinentes que permiten establecer una metodología para su reparación y/o rehabilitación.

El objetivo principal de este trabajo es caracterizar los concretos de media resistencia y los concretos de altas prestaciones (resistencia) en términos de algunos parámetros de durabilidad como la densidad, la absorción, la resistividad eléctrica del concreto, la velocidad de pulso ultrasónica, el ensayo acelerado de corrosión, el potencial de corrosión, el contenido de cloruros, entre otros.

Se realizaron tres tipos de mezcla (en términos de resistencia mecánica) 5000, 7000 y 10000 psi, con el fin de comparar los parámetros mencionados anteriormente, y la relación entre ellos, resaltando la importancia del comportamiento de los concretos de altas prestaciones ante agentes que ingresen en la matriz cementante para dar inicio al proceso de corrosión. Por otra parte, la prueba acelerada de corrosión dejó en evidencia los tiempos de agrietamiento de las muestras; para las mezclas de 5000, 7000 y 10000 psi se encontraron tiempos de agrietamiento de 91, 250 y 500 horas respectivamente.

Como conclusión, se encontró que las mezclas de media resistencia poseen un alto contenido de vacíos y una alta absorción capilar en comparación de las mezclas de mediana y alta resistencia. Por otra parte, las pruebas realizadas dejaron en evidencia el buen comportamiento que tienen las mezclas de altas prestaciones (resistencia) antes agentes que produzcan el inicio de la corrosión en el acero de refuerzo.

Palabras claves: Durabilidad, Concretos de altas prestaciones, Corrosión.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
3.	OBJETIVOS	6
3.1	Objetivo General	6
3.2	Objetivos Específicos	6
4.	MARCO TEÓRICO	7
4.1	Corrosión del Acero de Refuerzo	7
4.2	Absorción y Succión capilar en el concreto	9
4.3	Velocidad de Pulso Ultrasónico	11
4.4	Resistividad eléctrica en el concreto.....	13
4.5	Difusión del Ion Cloruro en el concreto.....	15
4.6	Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS)	17
4.7	Determinación de la corrosión del acero de refuerzo en diferentes mezclas de concretos expuestos a ambientes de cloruros.....	19
4.8	Ensayo Acelerado de Corrosión	21
5.	METODOLOGÍA	24
5.1	Revisión Bibliográfica.....	25
5.2	Caracterización de los Agregados	26
5.3	Definición de las Mezclas.....	26
5.4	Definición de la Geometría de Especímenes de Ensayo	27
5.4.1	Resistencia a la compresión, resistividad, ultrasonido y absorción.....	27
5.4.2	Difusión de Ion Cloruro.....	28
5.4.3	Ensayo Acelerado de Corrosión, Potencial de Corrosión, Espectroscopia de Impedancia Electroquímica.....	29
5.4.4	Succión Capilar	29
5.4.5	Densidad, absorción y vacíos en hormigón endurecido	30
5.4.6	Determinación de la corrosión del acero de refuerzo en diferentes mezclas de concretos expuestos a ambientes de cloruros.....	30
5.5	Ensayos de caracterización	32
5.5.1	Resistencia a la compresión.....	32
5.5.2	Resistividad	33

5.5.3	Ultrasonido.	34
5.5.4	Difusión de ion cloruro.	35
5.5.5	Prueba Acelerada de Corrosión.	36
5.5.6	Succión Capilar	38
5.5.7	Densidad, absorción y vacíos en hormigón endurecido	39
5.5.8	Pérdida de masa del acero de refuerzo.....	40
5.5.9	Determinación de la corrosión del acero de refuerzo en diferentes mezclas de concretos expuestos a ambientes de cloruros.	41
5.6	Ensayos Preliminares.....	41
5.7	Obtención de datos experimentales.....	42
6.	RESULTADOS PRELIMINARES	43
6.1.	Densidad	43
6.1.1.	Mezcla de 5000 psi.....	43
6.1.2.	Mezcla de 7000 psi.....	44
6.1.3.	Mezcla de 10000 psi.....	45
6.2.	Resistencia a la compresión y ultrasonido	46
6.2.1.	Mezcla de 5000 psi.....	46
6.2.2.	Mezcla de 7000 psi.....	47
6.2.3.	Mezcla de 10000 psi.....	48
6.3.	Resistividad eléctrica del concreto.....	49
6.3.1.	Mezcla de 5000 psi.....	50
6.3.2.	Mezcla de 7000 psi.....	51
6.3.3.	Mezcla de 10000 psi.....	53
6.4.	Prueba acelerada de corrosión.	55
7.	RESULTADOS.....	57
7.1.	Densidad, absorción y vacíos en hormigón endurecido	57
7.1.1.	Absorción después de la inmersión	57
7.1.2.	Absorción después de inmersión y ebullición	58
7.1.3.	Densidad bulk seca.....	59
7.1.4.	Densidad bulk después de inmersión	59
7.1.5.	Densidad bulk después de inmersión y ebullición.....	60
7.1.6.	Densidad Aparente.....	61
7.1.7.	Volumen permeable del espacio de poros.....	62

7.1.8.	Densidad	62
7.1.9.	Mezcla de 5000 psi.....	63
7.1.10.	Mezcla de 7000 psi.	63
7.1.11.	Mezcla de 10000 psi.	64
7.2.	Resistencia a la compresión y ultrasonido	65
7.2.1.	Mezcla de 5000 psi.....	67
7.2.2.	Mezcla de 7000 psi.....	68
7.2.3.	Mezcla de 10000 psi.....	69
7.3.	Resistividad eléctrica del concreto.....	70
7.3.1.	Mezcla de 5000 psi.....	70
7.3.2.	Mezcla de 7000 psi.....	72
7.3.3.	Mezcla de 10000 psi.....	74
7.4.	Difusión de ion cloruro	76
7.5.	Ensayo Acelerado de Corrosión.	79
7.6.	Pérdida de masa.....	83
7.7.	Succión Capilar.....	86
7.7.1.	Mezcla 5000 psi.....	87
7.7.2.	Mezcla 7000 psi.....	89
7.7.3.	Mezcla 10000 psi.....	91
7.8.	Determinación de la corrosión del acero de refuerzo en diferentes mezclas de concretos expuestos a ambientes de cloruros.....	94
7.8.1.	Carga Acumulada Macroelda de Corrosión	94
7.8.1.1.	Mezcla de 5000 psi.	94
7.8.1.2.	Mezcla de 7000 psi.	95
7.8.1.3.	Mezcla de 10000 psi.	96
7.8.2.	Potencial de corrosión.....	97
7.8.3.	Resistividad Ánodo-Cátodo y Cátodo-Cátodo	98
7.9.	Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS) y Potencial de corrosión ...	101
7.9.1.	Potencial de Corrosión de media celda (Ag/AgCl)	101
7.9.1.	Potencial de Corrosión de media celda (Cu/CuSO ₄)	102
7.9.2.	Primer mes del ensayo de EIS	103
7.9.1.	Segundo mes del ensayo de EIS.....	107
7.9.1.	Tercer mes del ensayo de EIS	110

8.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	114
8.1.1	Correlación Velocidad de pulso ultrasónico vs Resistencia a la compresión. 114	
8.1.2	Correlación Resistividad vs Resistencia a la compresión.	116
8.1.3	Potencial de corrosión de media celda	122
8.1.4	Correlación pérdida de masa vs densidad de corriente.....	124
8.1.5	Correlación rata de corrosión vs densidad de corriente.....	125
8.1.6	Densidad de corriente	125
8.1.7	Difusión del ion cloruro	126
8.1.8	Correlación Resistencia a la compresión vs Potencial de corrosión	129
8.1.9	Correlación relación agua/material cementante vs coeficiente de difusión	130
8.1.10	Correlación Resistencia a la compresión vs Rata de corrosión.....	132
9.	CONCLUSIONES.....	134
10.	BIBLIOGRAFÍA	137

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Esquema de Secuencia del proceso de corrosión en el hormigón (Tuutti, 1982).	9
Figura 2 Absorción inicial y absorción secundaria (ASTM C1585).	10
Figura 3 Gráfico promedio de la Sorptividad (Velocidad de absorción) para los hormigones con relación A/C de 0.4 (Howland y Martín, 2013).	11
Figura 4 Formas de registro de datos del ensayo de velocidad de pulso ultrasónico (Saint-Pierre et al., 2016).	12
Figura 5 a) Método de las cuatro puntas (Andrade y D'Andrea, 2011). b) Método de las caras paralelas (dos puntos).	14
Figura 6 Corriente de la macrocelda en el tiempo para 5 muestras G109 SCC50NA losas (Yu et al., 2010).	20
Figura 7 Montaje del experimento (NT BUILD 356).	22
Figura 8 Cambio de la corriente en el circuito en función del tiempo (NT BUILD 356).	22
Figura 9 Montaje experimental del ensayo (Aguirre-Guerrero et al., 2016).	23
Figura 10 Prueba acelerada de corrosión (Aguirre-Guerrero et al., 2016).	24
Figura 11 Geometría del ensayo de resistencia a la compresión.	28
Figura 12 Geometría del ensayo de difusión de ion cloruro.	28
Figura 13 a) Sección transversal del cilindro con longitud expuesta de la barra b) Esquema del ensayo de Acelerado de Corrosión, Potencial de Corrosión, Espectroscopia de Impedancia Electroquímica.	29
Figura 14 Esquema de la geometría del espécimen para el ensayo de succión capilar.	30
Figura 15 Geometría de los especímenes para el ensayo de densidad, absorción y vacíos.	30
Figura 16 Ubicación de interruptores en el montaje experimental.	31
Figura 17 Esquema del Ensayo de corrosión del acero de refuerzo (ASTM G109).	31
Figura 18 Ensayo de resistencia a la compresión.	32
Figura 19 Esquema de medición del ensayo de resistividad.	33
Figura 20 Configuración de las conexiones del medidor de resistencia.	34
Figura 21 Esquema de medición del ensayo de ultrasonido.	34
Figura 22 Registro de masa de la muestra a ensayar.	35
Figura 23 Área de extracción de cada disco de la muestra.	35
Figura 24 Ion selectivo de cloruros y muestra preparada.	36
Figura 25 Esquema del montaje del ensayo acelerado de corrosión.	37
Figura 26 Montaje del ensayo acelerado de corrosión.	37
Figura 27 Registro de pesos de los especímenes para el ensayo de succión capilar.	38
Figura 28 Montaje del ensayo de succión capilar.	38
Figura 29 Registro de la masa aparente inmersa.	39
Figura 30 Representación de la pérdida de masa por ciclos de lavado.	40
Figura 31 Esquema del ensayo de corrosión del acero de refuerzo.	41
Figura 32 Resultado de resistividad mezcla de 5000 psi.	51
Figura 33 Resultado de resistividad mezcla de 7000 psi.	53
Figura 34 Resultado de resistividad mezcla de 10000 psi.	55
Figura 35 Resultado preliminar del ensayo acelerado de corrosión.	56

Figura 36 Absorción después de la inmersión en función de la resistencia a la compresión	58
Figura 37 Absorción después de la inmersión y la ebullición en función de la resistencia a la compresión.....	58
Figura 38 Densidad bulk seca para las mezclas.	59
Figura 39 Densidad bulk después de la inmersión en función de la resistencia a la compresión	60
Figura 40 Densidad bulk después de la inmersión y ebullición en función de la resistencia a la compresión.....	61
Figura 41 Densidad aparente en función de la resistencia a la compresión.....	61
Figura 42 Volumen de vacíos en función de la resistencia a la compresión	62
Figura 43 Resumen de la evolución de la resistencia a la compresión en función del tiempo de curado.	66
Figura 44 Resumen de la evolución de la velocidad de pulso ultrasónico en función del tiempo de curado.	66
Figura 45 Resultado del ensayo de resistividad para la mezcla de 5000 psi.....	72
Figura 46 Resultado del ensayo de resistividad para la mezcla de 7000 psi.....	74
Figura 47 Resultado del ensayo de resistividad para la mezcla de 10000 psi.....	76
Figura 48 Perfiles de cloruros para un período de exposición de 35 días.....	78
Figura 49 Perfiles de cloruros para un período de exposición de 120 días.....	79
Figura 50 Gráfica de voltaje en función del tiempo.	80
Figura 51 Gráfica de densidad de corriente en función del tiempo.	80
Figura 52 Montaje del seguimiento fotográfico a una de las muestras.....	81
Figura 53 Pérdida de área residual del acero de refuerzo de la probeta 5000-1	84
Figura 54 Pérdida de área residual del acero de refuerzo de la probeta 5000-2	85
Figura 55 Pérdida de área residual del acero de refuerzo de la probeta 7000-3	85
Figura 56 Pérdida de área residual del acero de refuerzo de la probeta 7000-4	85
Figura 57 Pérdida de área residual del acero de refuerzo de la probeta 10000-3	86
Figura 58 Pérdida de área residual del acero de refuerzo de la probeta 10000-4	86
Figura 59 Gráfica de la absorción en función del tiempo para la mezcla de 5000 psi.....	88
Figura 60 Gráfica de la absorción en función del tiempo para la mezcla de 7000 psi.....	90
Figura 61 Gráfica de la absorción en función del tiempo para la mezcla de 10000 psi.....	93
Figura 62 Carga acumulada de la macrocelda de corrosión para la mezcla de 5000 psi en función del tiempo.	95
Figura 63 Carga acumulada de la macrocelda de corrosión para la mezcla de 7000 psi en función del tiempo.	96
Figura 64 Carga acumulada de la macrocelda de corrosión para la mezcla de 10000 psi en función del tiempo.	97
Figura 65 Esquema de mediciones de potenciales para las probetas ASTM G109.	98
Figura 66 Registro de potenciales para los tres tipos de mezcla en función del tiempo.....	98
Figura 67 Esquema de medición de resistividad de entre el ánodo y el cátodo.	99
Figura 68 Resistividad ánodo-cátodo.	99
Figura 69 Esquema de medición de resistividad de entre ambos cátodos.	100
Figura 70 Resistividad cátodo-cátodo.	100

Figura 71 Esquema de toma de datos para el ensayo de potencial de media celda (Ag/AgCl)	101
Figura 72 Potencial de corrosión de media celda en función del tiempo (Ag/AgCl)	102
Figura 73 Esquema de toma de datos para el ensayo de potencial de media celda (Cu/CuSO ₄)	102
Figura 74 Potencial de corrosión de media celda en función del tiempo (Cu/CuSO ₄)	103
Figura 75 Resultado del ensayo para la mezcla 5000-3 para el primer mes de ensayos...	104
Figura 76 Resultado del ensayo para la mezcla 5000-4 para el primer mes de ensayos...	104
Figura 77 Resultado del ensayo para la mezcla 7000-1 para el primer mes de ensayos...	105
Figura 78 Resultado del ensayo para la mezcla 7000-2 para el primer mes de ensayos...	105
Figura 79 Resultado del ensayo para la mezcla 10000-1 para el primer mes de ensayos.	106
Figura 80 Resultado del ensayo para la mezcla 10000-2 para el primer mes de ensayos.	106
Figura 81 Resultado del ensayo para la mezcla 5000-3 para el segundo mes de ensayos.	107
Figura 82 Resultado del ensayo para la mezcla 5000-4 para el segundo mes de ensayos.	108
Figura 83 Resultado del ensayo para la mezcla 7000-1 para el segundo mes de ensayos.	108
Figura 84 Resultado del ensayo para la mezcla 7000-2 para el segundo mes de ensayos.	109
Figura 85 Resultado del ensayo para la mezcla 10000-1 para el segundo mes de ensayos.	109
Figura 86 Resultado del ensayo para la mezcla 10000-2 para el segundo mes de ensayos.	110
Figura 87 Resultado del ensayo para la mezcla 5000-3 para el tercer mes de ensayos....	111
Figura 88 Resultado del ensayo para la mezcla 5000-4 para el tercer mes de ensayos....	111
Figura 89 Resultado del ensayo para la mezcla 7000-1 para el tercer mes de ensayos....	112
Figura 90 Resultado del ensayo para la mezcla 7000-2 para el tercer mes de ensayos....	112
Figura 91 Resultado del ensayo para la mezcla 10000-1 para el tercer mes de ensayos..	113
Figura 92 Resultado del ensayo para la mezcla 10000-2 para el tercer mes de ensayos..	113
Figura 93 Velocidad de pulso ultrasónico vs Resistencia a la compresión para el concreto de 5000 psi.	114
Figura 94 Velocidad de pulso ultrasónico vs Resistencia a la compresión para el concreto de 7000 psi.	115
Figura 95 Velocidad de pulso ultrasónico vs Resistencia a la compresión para el concreto de 10000 psi.	115
Figura 96 Resistividad vs Resistencia a la compresión para el concreto de 5000 psi.	116
Figura 97 Resistividad vs Resistencia a la compresión para el concreto de 7000 psi.	117
Figura 98 Resistividad vs Resistencia a la compresión para el concreto de 10000 psi.	117
Figura 99 Resistividad vs Velocidad de pulso Ultrasónico para el concreto de 5000 psi...	118
Figura 100 Resistividad vs Velocidad de pulso Ultrasónico para el concreto de 7000 psi.	118
Figura 101 Resistividad vs Velocidad de pulso Ultrasónico para el concreto de 10000 psi.	119

Figura 102 Velocidad de pulso ultrasónico vs período de curado (Ulucan ZÇ et. al, 2007)	121
Figura 103 Velocidad de Pulso ultrasónico vs Resistencia a la compresión (Ulucan ZÇ et. al, 2007)	122
Figura 104 Riesgo de corrosión de los potenciales medidos con el electrodo Ag/AgCl	123
Figura 105 Riesgo de corrosión de los potenciales medidos con el electrodo Cu/CuSO ₄ .	123
Figura 106 Relación entre la pérdida de masa y la densidad de corriente	124
Figura 107 Relación entre la rata de corrosión y la densidad de corriente	125
Figura 108 Densidad de corriente calculada del ensayo de espectroscopia de impedancia electroquímica.....	126
Figura 109 Perfiles de cloruro y su ajuste para la mezcla de 5000 psi con un tiempo de exposición de 35 y 120 días.	127
Figura 110 Perfiles de cloruro y su ajuste para la mezcla de 7000 psi con un tiempo de exposición de 35 y 120 días.	128
Figura 111 Perfiles de cloruro y su ajuste para la mezcla de 10000 psi con un tiempo de exposición de 35 y 120 días.	129
Figura 112 Correlación entre la resistencia a la compresión y el potencial de corrosión .	130
Figura 113 Correlación entre la relación agua/material cementante y el coeficiente de difusión del ion cloruro.....	131
Figura 114 Relación entre w/mc y el coeficiente de difusión (Arias W, 2014).....	132
Figura 115 Ratas de corrosión para concretos ordinarios y de alta resistencia bajo condiciones de laboratorio (Ismail y Ohtsu, 2006).	133
Figura 116 Correlación entre la resistencia a la compresión y rata de corrosión	133

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación de calidad del hormigón según la velocidad de pulso ultrasónica (Saint-Pierre et al., 2016).	13
Tabla 2 Riesgo de corrosión basado en los valores de resistividad eléctrica de AASHTO TP 95 (Hamed Layssi, et. al, 2015).	14
Tabla 3 Contenido máximo de cloruros solubles en agua en el concreto (NSR-10).	15
Tabla 4 Concentración umbral para distintas tipologías de concreto (Ann y Song, 2007). .	16
Tabla 5 Ensayos de caracterización de los agregados.	26
Tabla 6 Diseños de mezcla empleados para la investigación.	27
Tabla 7 Resultado preliminar de geometría y densidad de la mezcla de 5000 psi.	44
Tabla 8 Resultado preliminar de geometría y densidad de la mezcla de 7000 psi.	45
Tabla 9 Resultado preliminar de geometría y densidad de la mezcla de 10000 psi.	46
Tabla 10 Carga última, esfuerzo último y velocidad de onda promedio de la mezcla de 5000 psi.	47
Tabla 11 Carga última, esfuerzo último y velocidad de onda promedio de la mezcla de 7000 psi.	48
Tabla 12 Carga última, esfuerzo último y velocidad de onda promedio de la mezcla de 10000 psi.	49
Tabla 13 Resultados preliminares de resistividad eléctrica de la mezcla de 5000 psi.	50
Tabla 14 Resultados preliminares de resistividad eléctrica de la mezcla de 7000 psi.	52
Tabla 15 Resultados preliminares de resistividad eléctrica de la mezcla de 10000 psi.	54
Tabla 16 Resultado de geometría y densidad para la mezcla de 5000 psi.	63
Tabla 17 Resultado de geometría y densidad para la mezcla de 7000 psi.	64
Tabla 18 Resultado de geometría y densidad para la mezcla de 10000 psi.	65
Tabla 19 Carga última, esfuerzo último y velocidad de onda promedio de la mezcla de 5000 psi.	67
Tabla 20 Carga última, esfuerzo último y velocidad de onda promedio de la mezcla de 7000 psi.	68
Tabla 21 Carga última, esfuerzo último y velocidad de onda promedio de la mezcla de 10000 psi.	69
Tabla 22 Resultados de resistividad eléctrica de la mezcla de 5000 psi.	71
Tabla 23 Resultados de resistividad eléctrica de la mezcla de 7000 psi.	73
Tabla 24 Resultados de resistividad eléctrica de la mezcla de 10000 psi.	75
Tabla 25 Registro de datos de voltaje obtenidos del software para la edad de 35 días	77
Tabla 26 Registro de datos de voltaje obtenidos del software para la edad de 120 días ...	77
Tabla 27 Contenido de cloruros por peso de cemento – Período de exposición 35 días.	77
Tabla 28 Contenido de cloruros por peso de cemento – Período de exposición 120 días. .	78
Tabla 29 Evolución en el tiempo de la grieta en el ensayo acelerado de corrosión.	82
Tabla 30 Resultados de pérdida de masa y rata de corrosión.	83
Tabla 31 Registro de valores de absorción para las distintas muestras correspondientes a la mezcla de 5000 psi.	87
Tabla 32 Absorción inicial y secundaria de la mezcla de 5000 psi.	89

Tabla 33 Registro de valores de absorción para las distintas muestras correspondientes a la mezcla de 7000 psi.....	89
Tabla 34 Absorción inicial y secundaria de la mezcla de 7000 psi.....	91
Tabla 35 Registro de valores de absorción para las distintas muestras correspondientes a la mezcla de 10000 psi.....	92
Tabla 36 Absorción inicial y secundaria de la mezcla de 10000 psi.....	93
Tabla 37 Valores de resistencia a la polarización para el primer mes de ensayo	103
Tabla 38 Valores de resistencia a la polarización para el segundo mes de ensayo.....	107
Tabla 39 Valores de resistencia a la polarización para el tercer mes de ensayo.....	110
Tabla 40 Desarrollo de la resistencia a la compresión de un concreto RHA (Chao-Lung et al., 2011).	119
Tabla 41 Desarrollo de la resistividad de un concreto RHA (Chao-Lung et al., 2011).	120
Tabla 42 Desarrollo de la velocidad de pulso ultrasónico de un concreto RHA (Chao-Lung et al., 2011).	120
Tabla 43 Propiedades del concreto a distintas edades (Ulucan ZÇ et. al, 2007)	121
Tabla 44 Parámetros del análisis de resultados del ion cloruro a la edad de 35 días	127
Tabla 45 Parámetros del análisis de resultados del ion cloruro a la edad de 120 días	128

ÍNDICE DE VARIABLES

Variables	Unidad	Descripción
Cx	kg, %wc	Contenido de cloruros en el concreto
T	s, año, μ s	Tiempo de exposición de la estructura, tiempo de onda
X	cm, m	Distancia de recubrimiento de concreto
D _{ap}	m ² /seg	Coeficiente de difusión aparente
Cs	Kg, %wc	Contenido de cloruros en la superficie de concreto
Co	Kg, %wc	Contenido inicial de cloruros en el concreto
R _p	Ohm	Resistencia a la polarización
A	mm ² , cm ²	Área
L	mm, cm	Longitud de la muestra
ρ	kohm*cm	Resistividad
R	Ohm	Resistencia
σ	MPa, psi	Esfuerzo último promedio
F	kN, lb	Fuerza última
I _{CORR}	μ A, A	Corriente de corrosión
EIS	-	Espectroscopia de Impedancia Electroquímica
V	m/s	Velocidad de Onda
H	mm, cm	Altura de espécimen
η	%	Pérdida de masa
D	mm, cm	Diámetro
B	mm, cm	Ancho de la viga
K	cm, mm	Factor de forma
Z	ohm	Impedancia
m _o	g	Masa inicial de la muestra
m	g	Masa final después del lavado
CR	μ m/año	Rata de corrosión
w/mc	-	Relación agua / material cementante

1. INTRODUCCIÓN

La corrosión del acero de refuerzo es una causa que preocupa al sector de la construcción porque produce una degradación en las estructuras de concreto reforzado. Principalmente, el acero de refuerzo embebido en el concreto se encuentra protegido de las causas de la corrosión por la alcalinidad de la solución de poros (pH superior a 12.5); esta alcalinidad permite la formación de una capa pasiva en la superficie del refuerzo que impide el desarrollo de un proceso de corrosión. Este estado pasivo puede ser alterado por la destrucción de la capa protectora del refuerzo. Esta capa puede ser destruida por los iones cloruros o por cambio en la alcalinidad del concreto debido a la carbonatación. Para el caso de una estructura que se encuentre en un ambiente marino (como el de la costa Caribe Colombia), la corrosión del acero de refuerzo es producto del ingreso del ion cloruro en el recubrimiento de concreto (Poupard et al., 2006). Los productos resultados del proceso de corrosión son expansivos y generan fuerzas de tensión lo suficientemente altas dentro del concreto creando una expansión volumétrica en las barras de acero de la estructura. Teniendo en cuenta que la resistencia a la tracción del concreto es relativamente baja, alrededor del 10% de la resistencia a la compresión, este material se vuelve susceptible a la formación de grietas desde la barra hacia la superficie, estas grietas permiten que el oxígeno y la humedad viajen directamente hacia la barra, lo cual aumenta la velocidad de corrosión (Capozucca, 1995).

Actualmente existen varias técnicas para mejorar la durabilidad de las estructuras. Una de las técnicas mayormente adoptadas es la protección catódica por corriente impresa, que ha demostrado ser un método eficaz para detener la corrosión. Este método ha sido ampliamente aceptado y es una de las técnicas más utilizadas incluso para la rehabilitación de estructuras de concreto reforzado que sufren corrosión inducida por cloruros. Esta técnica funciona al polarizar negativamente el acero para cambiar el potencial de este a condiciones previas antes del inicio de la corrosión y para el caso de que la corrosión ya haya iniciado, esta técnica lleva el acero a un potencial constante que lleva a una condición

poco probable de falla por corrosión durante la vida útil de la estructura (Bhuiyan et al., 2018). También existen otros métodos como la protección catódica. Esta es una técnica electroquímica mayormente usada para reparación de estructuras de concreto reforzado y funciona mediante el paso de una pequeña corriente eléctrica desde el ánodo hasta el refuerzo de acero corroído, protegiéndolo de un mayor deterioro aumentando los iones hidroxilo (Wilson et al., 2013).

Se sabe que concreto reforzado es uno de los materiales empleados para la construcción con mayor uso debido a su bajo costo y poco mantenimiento. Este material puede verse afectado por agentes externos dependiendo de la zona, del entorno o de su ubicación geográfica (Shi et al., 2012). Estos agentes, como el ion cloruro, la carbonatación, los sulfatos, entre otros, reducen la vida útil de las estructuras ya que son la principal causa de la corrosión del acero de refuerzo. En Colombia, usualmente se emplea como práctica común aumentar el espesor de recubrimiento o emplear concretos de mayor resistencia, dependiendo de la categoría de exposición (NSR-10). Sin embargo, la práctica más común es la intervención correctiva, la cual se realiza al momento de que las estructuras presentan daños visibles o alguna patología que dé motivos para esta intervención, dando como resultado la reducción de vida útil de la estructura. Una vez inicie el deterioro de la estructura por corrosión, esta se podrá reparar parcialmente, teniendo en cuenta que existe un deterioro causado por los agentes que han llevado al concreto reforzado a este estado. (Koch et al., 2002).

En la presente investigación se busca resaltar la importancia de la caracterización completa del concreto y la relación que guardan las características de durabilidad con las propiedades mecánicas. Para lograr este objetivo, se diseñaron tres (3) tipos de mezcla en términos de resistencia mecánica, las cuales fueron comprobadas a partir de unos ensayos preliminares, como resistencia a la compresión, resistividad, velocidad de pulso ultrasónico y la prueba acelerada de corrosión. Parte del objetivo principal de la presente investigación viene dado por unos ensayos de caracterización que permitirán comparar las propiedades de cada

mezcla para asociar estas propiedades con la vida útil de las estructuras en ambientes marinos-costeros.

Los ensayos que se van a realizar son: densidad, porcentaje de vacíos, succión capilar, resistencia a la compresión, velocidad de pulso ultrasónico, resistividad, ensayo acelerado de corrosión, espectroscopia de impedancia electroquímica, difusión de ion cloruro, potencial de corrosión y corrosión del acero de refuerzo en concretos expuestos a ambientes contaminados por cloruros.

Cada uno de los ensayos mencionados anteriormente, relaciona un parámetro asociado a la durabilidad, es así como los resultados se van a correlacionar entre sí con el fin de proyectar la vida útil de estructuras que han sido atacadas por agentes que dan inicio a la corrosión, en el cual juega un papel importante la resistencia mecánica. Además, las correlaciones encontradas ayudan a predecir el comportamiento de un concreto de las mismas propiedades estudiadas, haciendo uso de los ajustes que deja la relación entre los parámetros estudiados en este trabajo.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los concretos de altas prestaciones/rendimiento están relacionados directamente a la durabilidad. Estos concretos, a través de los ensayo de medición muestran el comportamiento que tienen en ambientes contaminados por cloruros y de alta humedad relativa (problemas de carbonatación) ya que su porosidad no permite el ingreso de agentes agresivos que inicien un ataque al refuerzo embebido en el concreto y causar corrosión (Elahi et al., 2010). Los cloruros y la carbonatación dañan de dos maneras la estructura de concreto: En primer lugar, por la reducción del área de la sección transversal del refuerzo y en segundo lugar, por los productos de corrosión que generan un aumento del volumen del acero. El aumento de volumen induce la tensión, lo que produce grietas y eventuales fallas estructurales (Aperador Chaparro et al., 2012).

El comportamiento del concreto reforzado se puede estimar de una manera bastante aceptable con varias pruebas no destructivas teniendo en cuenta las condiciones de exposición del concreto. A través del tiempo se han empleado algunas técnicas de ensayos no destructivos en el laboratorio, para la evaluación de algunas características de los concretos. La mayoría de estos ensayos han ganado reconocimiento mundial debido a su facilidad y simplicidad en la estimación del comportamiento y la calidad general del concreto. Por ejemplo, la técnica de resistividad eléctrica es una medida fácil para acceder a las propiedades de transporte en estructuras de concreto reforzado duraderas. La probabilidad de corrosión se inhibe con valores de resistividad más altos en concreto debido al difícil transporte de iones (Singh y Singh, 2018). La cantidad de propiedades que pueden evaluarse usando ensayos no destructivos y pruebas parcialmente destructivas es bastante amplio e incluye parámetros fundamentales como densidad, resistencia a la compresión, absorción superficial, resistividad, velocidad de pulso ultrasónico, entre otros (Malek y Kaouther, 2014).

En Colombia y en particular en la región caribe, los concretos de mayor uso, son los de resistencias normales o inferiores a 6 ksi (Russell et al., 1977), lo que nos lleva a inferir que las edificaciones convencionales, es decir, grupo de uso I (Reglamento Colombiano de

Construcción Sismo Resistente NSR-10) poseen vidas útiles reducidas. Además de esto, hay que tener en cuenta los errores que se generan en la etapa de la construcción, por ejemplo, la variación del recubrimiento de diseño en los elementos (NSR-10 C7.7.), falta de curado o curado insuficiente, segregación del concreto, entre otros.

Por otra parte, surge la importancia de conocer las propiedades de los concretos y su comportamiento ante agentes externos que causen deterioro en el acero de refuerzo, todo esto con el fin de generar una caracterización integral de los concretos en estudio. Es por ello que se hace importante revisar a través de ensayos, los concretos de mediana y alta resistencia para resaltar la importancia de emplear concretos durables que se relacionen con un tiempo amplio de inicio de la corrosión.

Con base en lo anterior, se plantea la siguiente pregunta: ¿Es posible hacer una caracterización por durabilidad de mezclas de concreto que se emplean en la actualidad con el fin de extender su vida útil en aras de que aumente el tiempo de inicio de la corrosión?

Para dar respuesta a la pregunta problema, se proponen los siguientes objetivos para la investigación:

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar parámetros de durabilidad en concretos de mediana y alta resistencia en ambientes contaminados por cloruros.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar los parámetros de durabilidad y de resistencia mecánica de tres tipos de concreto.
- Encontrar correlaciones entre los parámetros de durabilidad y de resistencia mecánica evaluados.
- Evaluar los parámetros electroquímicos asociados a la corrosión del acero en el concreto y comparar su comportamiento para las diferentes mezclas evaluadas.
- Identificar la importancia de emplear concretos de alta resistencia para mejorar la vida útil de las estructuras de concreto reforzado.
- Emplear los resultados como criterio de selección de concretos en términos de durabilidad en ambientes marinos-costeros.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO

El concreto reforzado es un material de gran uso y económico que puede tomar varias formas y acabados dependiendo del uso que se le quiera dar. Usualmente es un material resistente con un gran desempeño a lo largo de su vida útil, sin embargo, en muchos casos no funciona de forma adecuada debido a diseños mal realizados, construcción deficiente, selección incorrecta de los materiales, entre otros.

Un problema importante que enfrenta este material es la corrosión del acero de refuerzo ya que deteriora las estructuras después de haber estado expuesto a condiciones que producen deterioro en la armadura.

Las principales causas que producen la corrosión son: la carbonatación, el transporte de cloruros y sulfatos, poco recubrimiento de la armadura, entre otros.

La corrosión es un proceso electroquímico entre un metal y su entorno que conduce a un deterioro del material y sus propiedades (ASTM G-15, 2008). En ella ocurren reacciones de óxido-reducción que se traducen en las reacciones de corrosión electroquímica (Smith & Hashemi, 2008):

- **Reacción de oxidación:** El metal forma iones que pasan a solución acuosa, de esta forma, se producen electrones y los átomos del metal forman cationes. También es llamada reacción anódica debido a que cuando este proceso ocurre se crean ánodos locales en la superficie del metal.
- **Reacciones de reducción:** Los iones del metal pierden su carga de valencia y por tanto se presenta un consumo de electrones. También es llamada reacción catódica debido a la formación de cátodos locales cuando esté proceso ocurre.
- **Reacciones de corrosión electroquímica:** En este proceso espontáneo, ocurren los dos tipos de reacción en simultáneo, de oxidación y reducción. De esta forma, los cationes migran a los cátodos locales y los aniones a los ánodos locales, donde el metal sufre la corrosión.

El fenómeno de la corrosión se debe en principio a dos factores que causan la degradación del refuerzo en el concreto, como son la carbonatación y la corrosión inducida por el ion cloruro. La corrosión inducida por carbonatación se da con frecuencia en ambientes secos donde es posible que se produzca el óxido de carbono necesario para alcanzar el recubrimiento del concreto. Por otro lado, en ambientes que contienen cloruros, el ingreso de este se da mucho más rápido que el proceso de carbonatación, por lo tanto, se hace más probable que cause primero un deterioro en la estructura, hasta el punto de llevarla al final de su vida útil (Ranjith et al., 2016). Es ahí donde es muy importante conocer la secuencia del proceso de vida útil de una estructura. Teniendo en cuenta lo anterior, es importante mencionar el modelo propuesto por Tuutti en 1982 (Figura 1), donde se describe el modelo de inicio de la corrosión a través de una gráfica que representa el ingreso de los agentes que producen la corrosión en función del tiempo.

La solución de poros que recubre el acero de refuerzo es una solución con un alto grado de alcalinidad, es decir, el pH puede variar entre 12 y 14. Lo anterior causa que los productos de corrosión que se fijan a la superficie del metal sean difíciles de disolver. La razón por la cual los productos se fijan, es debido a la alta permeabilidad en el concreto, que permite el ingreso de los agentes que deterioran la capa pasiva del acero (Moreno A. 2001).

Una vez el acero haya perdido ese estado de pasivación, entramos en un período conocido como: tiempo de propagación. Algunas de las causas que dan inicio a este período son: el contenido de humedad del hormigón en el sistema de poros, las temperaturas alrededor de las áreas de corrosión, la composición química de la solución de poros alrededor del embebido acero, el espesor del recubrimiento de hormigón y otros factores que son difíciles de definir, por ejemplo, el medio ambiente y variaciones a lo largo del metal. Esto permite que sustancias como los cloruros penetren hasta llegar al acero para contrarrestar esa pasividad.

Una vez iniciado el proceso de corrosión, la velocidad de este proceso viene dado por las reacciones que se estén generando en el ánodo y el cátodo. La velocidad de corrosión puede variar entre alta y baja, dependiendo del tiempo de inicio de la corrosión (Tuutti, 1982).

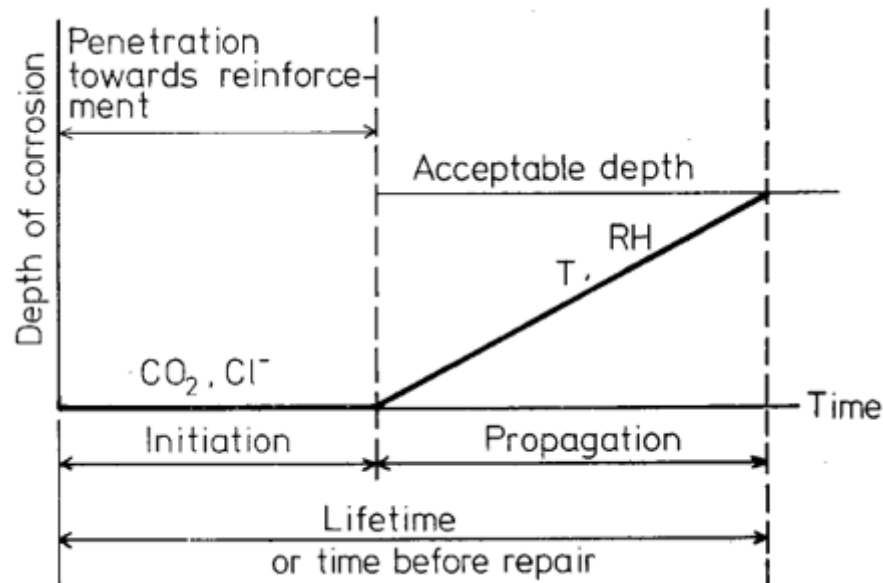


Figura 1 Esquema de Secuencia del proceso de corrosión en el hormigón (Tuutti, 1982).

4.2 ABSORCIÓN Y SUCCIÓN CAPILAR EN EL CONCRETO

Antes de hablar de absorción y succión capilar, es importante definir el término de porosidad que está ampliamente relacionado con la capacidad de absorción que tiene el concreto. La porosidad es uno de los parámetros en el concreto endurecido de mayor influencia en la dinámica del transporte de los agentes agresivos hacia el interior de su estructura. Para ser más específicos, el estado poroso-capilar del concreto es la porosidad efectiva, es decir, la porosidad conectada con el entorno, la que posee una influencia importante en el intercambio de humedad con el entorno y a su vez en la alta probabilidad de garantizar el transporte de dichos agentes. El parámetro de la porosidad efectiva del concreto, está considerado como una medida del grado de durabilidad de las estructuras frente a los agentes agresivos (Howland y Martín, 2013).

La absorción capilar I expresada en mm, empleando el método de la norma ASTM C1585, se define como el cambio en la masa de la probeta en el tiempo, dividida entre el producto del área de la sección transversal de la probeta de ensayo y la densidad del agua. Para la ejecución de este ensayo la variación de la densidad del agua con la temperatura es ignorada debido a que este valor no cambia significativamente. El valor de la absorción capilar I es determinado a partir de la siguiente ecuación:

$$I = \frac{m_t}{A * d} \quad (1)$$

Donde:

I = Absorción capilar [mm].

m_t = cambio de masa en función del tiempo [g]

A = Área de la sección transversal [mm²]

d = densidad del agua [g/mm³]

Haciendo uso de los parámetros que evalúa el estándar ASTM dentro de este ensayo, se deben realizar unos ajustes en dos partes de la figura 2 de este ensayo para determinar la absorción inicial que va desde el primer (1er) minuto hasta las 6 primeras horas y la absorción secundaria tomada desde 1 día hasta completar los 7 días que tardar el ensayo.

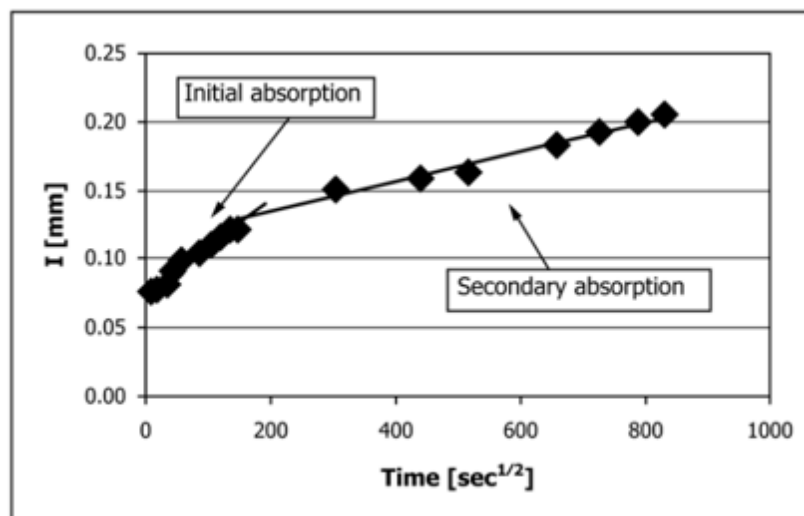


Figura 2 Absorción inicial y absorción secundaria (ASTM C1585).

De acuerdo con la revisión de la literatura, se encontraron que los valores relacionados a relaciones w/mc de 0.40, al igual que para 0.45, empleado tres réplicas para cada relación

y registrando valores de absorción inicial de 3.5×10^{-3} y 5.4×10^{-3} y para absorción secundaria valores de 1.3×10^{-3} y 2.2×10^{-3} , respectivamente. A continuación, se presenta en la figura 3, la gráfica de absorción para los concretos estudiados (Howland y Martín, 2013).

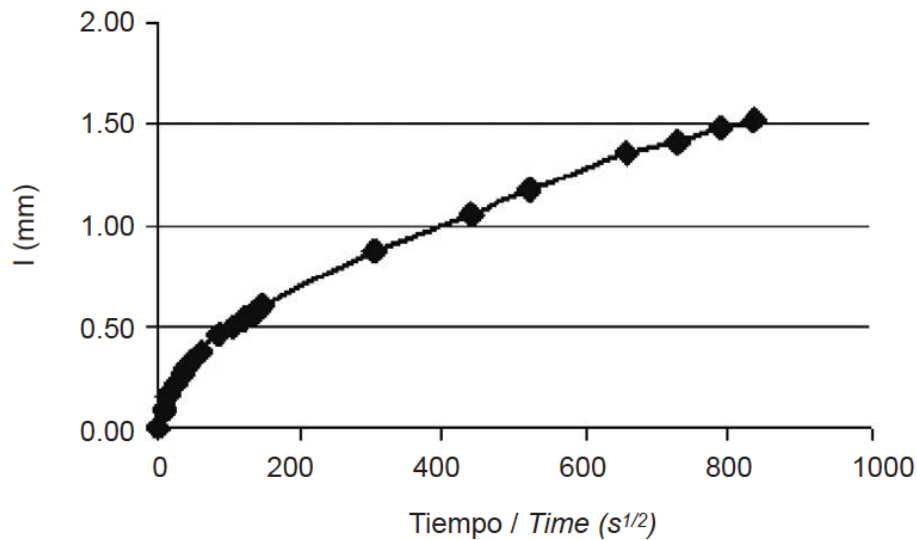


Figura 3 Gráfico promedio de la Sorptividad (Velocidad de absorción) para los hormigones con relación A/C de 0.4 (Howland y Martín, 2013).

4.3 VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO

Este ensayo no destructivo tiene como finalidad determinar la velocidad de propagación de onda a través del concreto. Además, permite identificar algunas propiedades asociadas con la calidad del concreto como la homogeneidad, presencia de fisuras, imperfecciones, cambios en el concreto, entre otras. Este ensayo es importante debido a que ayuda a determinar la calidad del concreto, empleando como parámetro la velocidad que toma una onda de viajar de un lado a otro del cilindro.

La norma correspondiente a este ensayo es la ASTM C597, la cual describe los alcances, usos, equipos, y análisis de información correspondiente a este ensayo. Dependiendo del elemento estructural que se esté midiendo y las limitaciones encontradas, las lecturas pueden ser tomadas de forma directa, semi-directa o indirecta (Figura 4). El equipo empleado cuenta con un emisor y un receptor, en el cual se emite una onda y el equipo

registra el tiempo que tarda en llegar la onda (Hwang et al., 2018). Una vez obtenido el valor del tiempo, se debe registrar la distancia entre el emisor y el receptor con el fin de calcular la velocidad de onda con la ecuación No. 3.

$$V = \frac{L}{T} \quad (2)$$

Donde:

V = Velocidad de onda [m/s].

L = Distancia entre el emisor y el receptor (altura del cilindro)[cm].

T = Tiempo que tarda en viajar la onda [μ s].

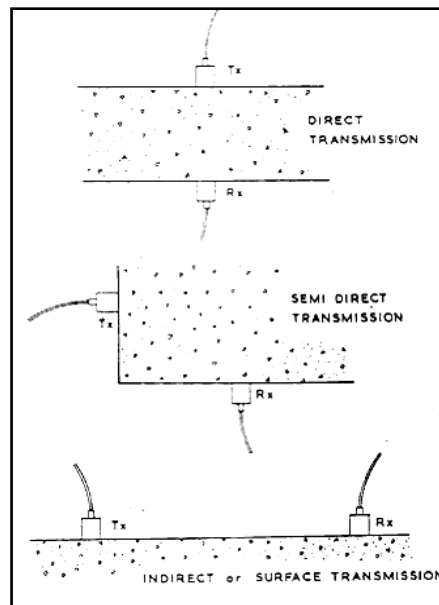


Figura 4 Formas de registro de datos del ensayo de velocidad de pulso ultrasónico (Saint-Pierre et al., 2016).

Existen algunas condiciones del ensayo que pueden afectar las mediciones, es por ello que se debe tener en cuenta lo siguiente (Saint-Pierre et al., 2016):

- La velocidad de pulso ultrasónica no debe verse alterada al realizar mediciones en dos superficies diferentes del elemento, siempre y cuando no varíe el ángulo de medición (medición directa 90°).

- b) Para mediciones en campo, usualmente la influencia del refuerzo es pequeña siempre y cuando el conjunto de barras se encuentre orientado de forma perpendicularmente a la trayectoria del pulso.
- c) Para las pruebas en laboratorio, la humedad en el hormigón puede ser significativa en el pulso ultrasónico, lo que se realiza usualmente es que se retira la humedad superficial de la probeta para evitar alteraciones en los resultados. En general, la velocidad se incrementará a medida que aumenta el contenido de humedad, y con ello se puede obtener un resultado que no corresponde a la calidad del concreto reforzado medido.

Los valores de ultrasonido obtenidos poseen unos rangos que deben ser comparados de acuerdo con la tabla No. 1.

Tabla 1 Clasificación de calidad del hormigón según la velocidad de pulso ultrasónica (Saint-Pierre et al., 2016).

Velocidad de la onda [m/s]	Calidad del hormigón
Más de 4570	Excelente
De 3650 a 4570	Buena
De 3050 a 3650	Regular a dudosa
De 2130 a 3050	Pobre
Menos de 2130	Muy pobre

4.4 RESISTIVIDAD ELÉCTRICA EN EL CONCRETO

De acuerdo con la Ley de Ohm, la resistividad corresponde a una propiedad volumétrica e intrínseca del material e indica la resistencia al paso de las cargas eléctricas, la ecuación para el cálculo de la resistividad se presenta a continuación (Andrade y D'Andrea, 2011).

$$\rho = R \frac{A}{L} = R * K \quad (3)$$

Donde:

ρ = Resistividad [$k\Omega - cm$].

R = Resistencia [Ω].

$A = \text{Área de la sección transversal [cm}^2\text{]}.$

$L = \text{Longitud entre placas[cm]}.$

$K = \text{Factor de forma [cm]}.$

Para realizar las mediciones de resistividad existen dos métodos, el método de las cuatro puntas y el método de las caras paralelas para probetas cilíndricas (Figura 5).

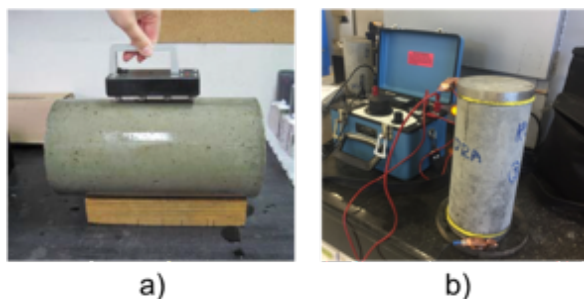


Figura 5 a) Método de las cuatro puntas (Andrade y D'Andrea, 2011). **b)** Método de las caras paralelas (dos puntos).

La resistividad es a su vez considerada una medida de la porosidad del concreto reforzado; al obtener un valor alto de resistividad, mayor será su resistencia mecánica. Además, otro parámetro que mide la resistividad, es la saturación, es por ello que, cuando el concreto no está saturado de agua, la resistividad crece. Por lo que, la resistividad es un ensayo que también sirve para indicar la calidad del concreto y su porosidad, es por ellos que es importante realizar la medición de estos parámetros (Andrade y D'Andrea, 2011).

Tabla 2 Riesgo de corrosión basado en los valores de resistividad eléctrica de AASHTO TP 95 (Hamed Layssi, et. al, 2015).

Riesgo de corrosión	Resistividad [kΩ-cm]
Alto	<12
Moderado	12 a 21
Bajo	21 a 37
Muy Bajo	37 a 254
Despreciable	>254

4.5 DIFUSIÓN DEL ION CLORURO EN EL CONCRETO

El proceso de corrosión debido a los cloruros se identifica en estructuras expuestas a ambientes marinos. Las estructuras de estas características contendrán un alto contenido de cloruros debido a los iones presentes en el agua de mar, con la posibilidad del transporte por las brisas de las zonas costeras y los depósitos en el concreto.

Teniendo en cuenta el modelo de vida útil planteado por Tuutti, (1982), para que inicie el proceso de corrosión, es necesario que los iones cloruro se transporten desde el exterior hasta llegar al acero de refuerzo a través de la matriz del concreto. Una vez que se deposita en el acero, se acumula la cantidad suficiente de iones hasta alcanzar una concentración crítica, la cual tiene la capacidad de romper la estabilidad de la capa pasiva del refuerzo y dar inicio al proceso de corrosión (Angélica del Valle Moreno, et. al, 2001). Esta concentración crítica se le conoce como umbral de cloruros. Se encuentran valores reportados en la literatura del orden de 0.2 a 0.4% por peso de cemento (Babaee y Castel, 2018).

De acuerdo con lo anterior, existe un límite máximo de cloruros en Colombia dependiendo del tipo de exposición de la estructura (Tabla 3). La clase de exposición con que exige un valor umbral de cloruro, es la C2 que corresponde a "Concreto expuesto a la humedad y a una fuente externa de cloruros provenientes de productos químicos descongelantes, sal, agua salobre, agua de mar o salpicaduras del mismo origen" (Tabla C.4.2.1 NSR-10).

Tabla 3 Contenido máximo de cloruros solubles en agua en el concreto (NSR-10).

Clase de Exposición	Relación a/mc máx. \pm	Resistencia a la compresión mín. f'_c [MPa]	Contenido máximo de iones cloruro (Cl^-) solubles en agua en el concreto, porcentaje por peso de cemento		Requisitos relacionados
			Concreto reforzado	Concreto Preesforzado	
C0	N/A	17	1.00	0.06	Ninguno
C1	0.50	17	0.30	0.06	
C2	0.40	35	0.15	0.06	7.7.6, 18.16

Para efectos prácticos, la importancia del ensayo es conocer el tiempo que tardan los cloruros en llegar al acero de refuerzo de una estructura, Por lo tanto al momento de evaluar las condiciones de una estructura se hace indispensable conocer la profundidad que han penetrado estos agentes, ya que estos no deben superar el espesor de recubrimiento del concreto porque se instalarían en la superficie del acero deteriorando la capa pasiva. Para relacionar la importancia de las variables que intervienen en el análisis de cloruros, como lo son el espesor de recubrimiento, el coeficiente de difusión, la concentración inicial y la concentración en la superficie, se usa una expresión matemática que sirve para predecir la velocidad de penetración, o que puede ajustarse a los perfiles de cloruros encontrados en las estructuras para encontrar parámetros de durabilidad asociados a iones cloruro. Esta expresión es la solución de la segunda ley de Fick, la cual da como resultado la expresión conocida como “la ecuación de la función error”.

Tabla 4 Concentración umbral para distintas tipologías de concreto (Ann y Song, 2007).

Condición	Valor Umbral Cloruros totales (% , cem.)	Método de detección
Muestra + Cl- interno	0.5-2.0	Corriente de macrocelda
	0.079-0.19	Impedancia AC
	0.32-1.9	Pérdida de masa
	0.78-0.93	Potencial de media celda
	0.45 (SRPC)	
	0.90 (15% PFA)	
	0.68 (30% PFA)	
	0.97 (30% GGBS)	
Muestra + Cl- externo	0.35-1.00	
	0.227	Polarización
	0.5-1.5	potencial de media celda
	0.7 (OPC)	Pérdida de masa
	0.65 (15% PFA)	
	0.5 (30% PFA)	
	0.20 (50% PFA)	
	1.8-2.9	Polarización
	0.5-1.4	-
	0.6-1.4	Macrocella

Para la tabla anterior, se registran valores típicos para distintas tipologías de concreto. Además, se muestra el método empleado para identificar esos valores críticos, incluso de autores que emplearon algunas adiciones, por ejemplo, ceniza volante, humo de sílice, entre otras, para ver el comportamiento de este umbral bajo ciertas condiciones de exposición (Ann y Song, 2007).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (4)$$

La ecuación de la función error que sirve para describir el ajuste de los perfiles de cloruros se presenta a continuación:

$$C_x = C_s - (C_s - C_o) \operatorname{erf}\left(\frac{X}{\sqrt{4D_{ap}T}}\right) \quad (5)$$

Donde:

C_x = Concentración a la distancia x [% por peso de cemento].

C_o = Concentración inicial [% por peso de cemento].

C_s = Concentración superficial [% por peso de cemento].

X = profundidad alcanzada [cm].

D_{ap} = coeficiente aparente de difusión [m^2/s].

T = tiempo [días, horas].

En la ecuación anterior, el término de coeficiente de difusión, se le llama aparente ya que este varía con el tiempo, sin embargo, se puede usar con fines de predicción del contenido de cloruros, ya que este coeficiente ignora otros parámetros más complejos y no sigue un comportamiento riguroso de la Ley de Fick (Ecuación 4) (Angélica del Valle Moreno, et al, 2001).

4.6 ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA (EIS)

El ensayo de espectroscopia de impedancia electroquímica es una técnica de corriente alterna que registra información variando la frecuencia. Cuando varía la frecuencia de la

señal enviada, la corriente circula a través de la interface acero/concreto. La impedancia es una medida de la capacidad de un circuito para resistir el flujo de corriente eléctrica, y su importancia es que proporciona información sobre la resistividad eléctrica, las propiedades dieléctricas del recubrimiento del acero y el mecanismo de reacción en la interface acero/concreto.

La fundamentación de la ejecución de este ensayo es crear un circuito eléctrico equivalente que se aproxime a elementos eléctricos que componen la interface. En el circuito existe la resistencia en el electrolito, la resistencia a la transferencia de carga y la capa compacta de los límites de las fases. Una vez inicia el ensayo, la corriente circulará por los elementos que presenten menor resistencia y esto da como origen una caída de potencial.

Para el caso del concreto, la resistividad se debe considerar por lo que puede interferir al momento de dar respuesta en la interface acero-concreto y proporcionaría una lectura incorrecta, por lo que se debe realizar la medición de la resistencia a la polarización (R_p) con compensación óhmica, donde se estima la resistividad del concreto y permita calcular la resistencia de la transferencia de carga.

Para la interpretación de los diagramas generados con información de corriente alterna, teniendo en cuenta el concepto de impedancia (Z). El parámetro Z es un indicador de la resistencia al paso de señal eléctrica. Teniendo en cuenta lo anterior, es necesario tener en cuenta la Ley de Ohm:

$$Resistencia = \frac{Voltaje}{Corriente} \quad (6)$$

Siguiendo con la definición de la Ley de Ohm, para el caso de corriente alterna se tiene la siguiente ecuación:

$$Z = \frac{V(w)}{I(w)} \quad (7)$$

Donde:

Z = Impedancia del circuito.

$V(w)$ = Voltaje en función de la frecuencia.

$I(w)$ = Corriente en función de la frecuencia.

Una vez realizado el ensayo, se realiza un ajuste equivalente al circuito simulado con el fin de encontrar el valor correspondiente a la resistencia a la polarización (R_p).

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (8)$$

Donde:

i_{corr} = Corriente de corrosión [μA].

B = Constante de Stern – Geary, este valor varía entre 13 – 52 mV.

R_p = Resistencia a la polarización [Ω].

4.7 DETERMINACIÓN DE LA CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO EN DIFERENTES MEZCLAS DE CONCRETOS EXPUESTOS A AMBIENTES DE CLORUROS

El ensayo establece la importancia de evaluar los efectos que produce una solución, en este caso de cloruro de sodio, en el acero de refuerzo embebido en el concreto. Un uso importante que se le da a este método podría ser la evaluación del comportamiento de diferentes mezclas de concreto ante la corrosión del acero embebido.

De acuerdo con las investigaciones asociadas al tema, se encontraron valores correspondientes a la corriente de la macrocelda de corrosión entre 1 y 3 μA , usando mezclas con relación w/mc cercanas al 0.5. Aunque estos autores emplean la misma geometría de la estándar ASTM G109, la solución empleada tenía una mayor concentración (15%). De acuerdo con lo anterior, se presenta una gráfica con los resultados del ensayo en función del período de exposición (Yu et al., 2010).

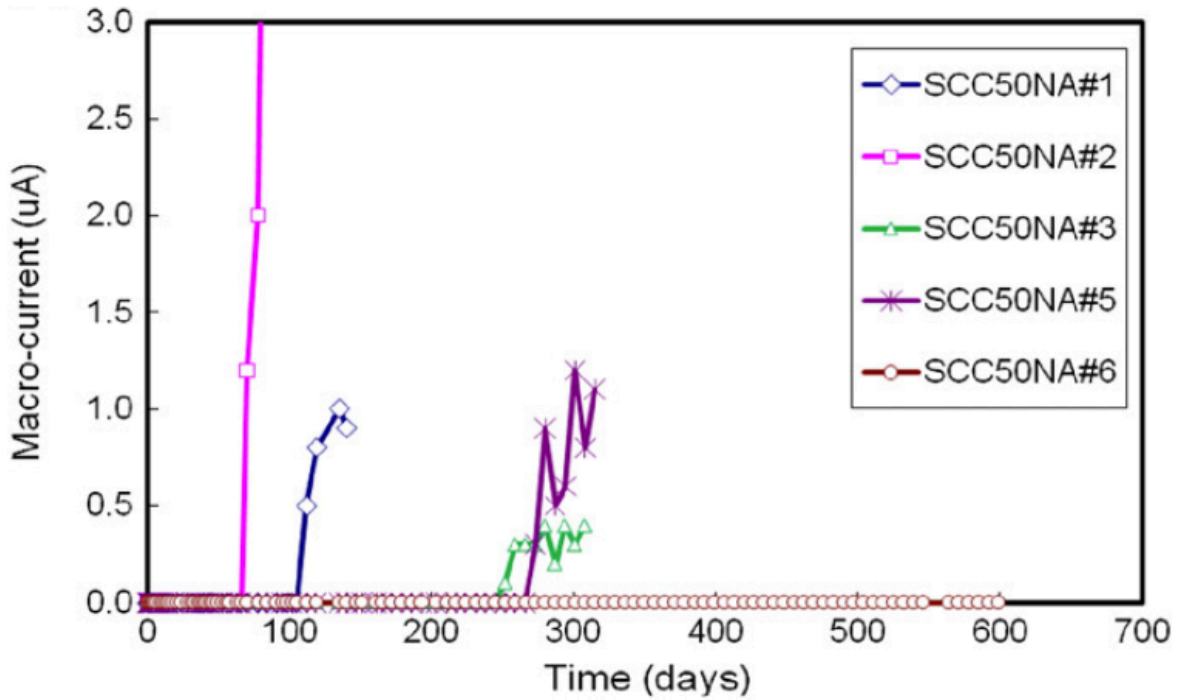


Figura 6 Corriente de la macrocelda en el tiempo para 5 muestras G109 SCC50NA losas (Yu et al., 2010).

La ejecución de este ensayo viene dado a través de un circuito que se crea para inducir la corrosión en el ánodo realizando una conexión con los cátodos. Se debe medir la diferencia de voltaje a través de la resistencia, este valor se usa para calcular la corrosión del ánodo. El equipo para realizar las mediciones debe ser un voltímetro de alta precisión ya que los voltajes al inicio de la prueba son muy bajos.

Para poder llevar un control de las muestras, es importante conocer la relación entre la corriente acumulada total y el tiempo de exposición de la muestra ya que se requiere llevar un control del valor alcanzado mínimo (150 Coulombs) para mostrar signos de corrosión visible. La corriente total acumulada viene dada por la siguiente expresión:

$$TC_j = TC_{j-1} + [(t_j - t_{j-1}) * (i_j - i_{j-1})/2] \quad (9)$$

Donde:

TC = Corrosión total [Coulombs].

t_j = tiempo en el cual es medida la corriente [segundos].

i_j = Corriente de la macrocelda en el tiempo t_j [A].

La corriente de la macrocelda debe ser el resultado del voltaje medido, dividido entre la resistencia (ley de Ohm, Ecuación 5). Una vez la prueba haya alcanzado un valor de 150 Coulombs, la macrocelda de corrosión ya ha alcanzado el valor suficiente para alcanzar un estado de corrosión asociado al ingreso de cloruros en la superficie de la viga a través de la matriz de concreto, que ha llegado a romper la capa pasiva que tiene el acero de refuerzo.

4.8 ENSAYO ACELERADO DE CORROSIÓN

Este ensayo tiene como finalidad evaluar la permeabilidad del ion cloruro a través de la matriz del concreto, empleando un método acelerado donde se le aplica un voltaje externo en la barra embebida en el espécimen de concreto (NT BUILD 356). Para realizar este ensayo se deben tener en cuenta algunos factores:

- a) El voltaje externo aplicado al montaje experimental. De acuerdo con la norma NT BUILD 356 (*Nordtest method*) el voltaje aplicado debe ser de 5 voltios.
- b) La geometría de la probeta fue de 76.2 mm de diámetro por 152.4 mm de longitud.
- c) La longitud expuesta de la barra corresponde a la zona que se va a ver afectada por el proceso de corrosión inducido a través del voltaje impreso.
- d) La solución donde se van a encontrar inmersas las probetas debe ser del 3% de NaCl de acuerdo con la norma.

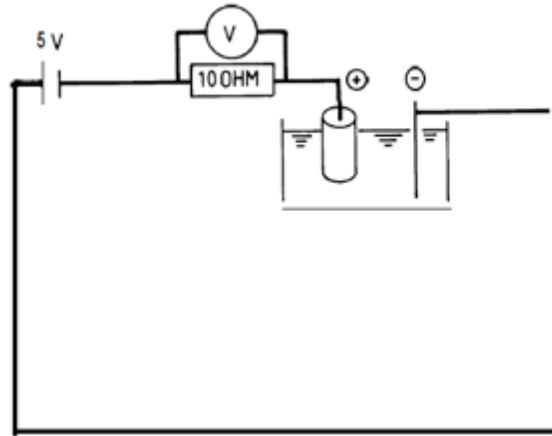


Figura 7 Montaje del experimento (NT BUILD 356).

Para la ejecución del ensayo, se realizará el registro de la diferencia de voltaje antes y después de la resistencia. De acuerdo con la ley de Ohm (Ecuación 5), al obtener el valor del voltaje, este será dividido entre la resistencia y se obtendrá la corriente que tiene el circuito en el instante T ; además, se puede calcular la densidad de corriente dividiendo la corriente obtenida del circuito entre el área expuesta (valor constante).

Al inicio de la prueba, el valor de la corriente será constante, una vez los cloruros alcancen la penetración, se identificará un cambio abrupto de esta variable (figura 8) hasta mostrar la primera grieta visible en el espécimen.

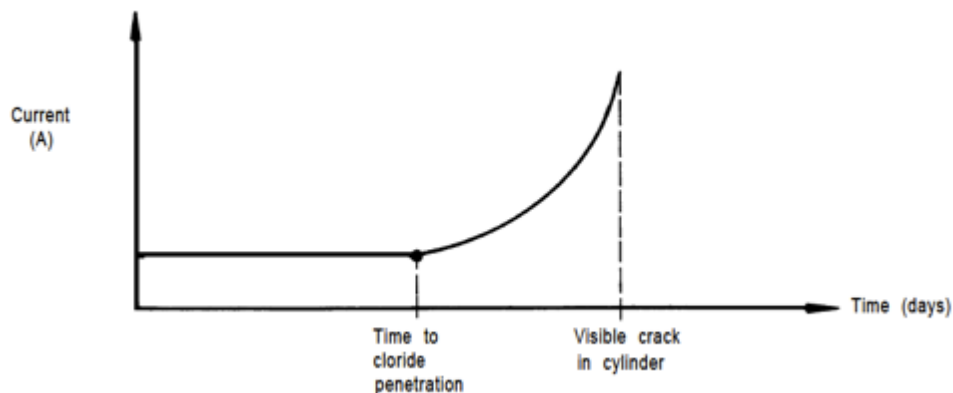


Figura 8 Cambio de la corriente en el circuito en función del tiempo (NT BUILD 356).

Al culminar el ensayo, se debe reportar la gráfica de corriente (densidad de corriente) en función del tiempo con el fin de identificar el tiempo de la grieta visible en el espécimen.

De acuerdo con la revisión de literatura, se realizó este ensayo para una mezcla de concreto con el aditivo superplastificante (SF) Sika Viscocrete 20HE. Se empleó una geometría con dimensiones de 76,2 por 152,4 mm. Cada espécimen tenía una barra de acero con una longitud de 150 mm y un diámetro de 6,4 mm colocado de manera concéntrica con el cilindro. Por otra parte, se definió una zona de exposición de 60 mm de largo, que corresponde al área que estaba incrustada dentro del hormigón. El resto de la varilla se recubrió con pintura epóxica resistente a la corrosión.

Después de haber pasado por el proceso de curado durante 28 días, las muestras se sumergen parcialmente en una solución de 3,5% de NaCl y un voltaje constante de 5V aplicado con una fuente externa entre el ánodo (acero embebido) y el cátodo (placa de acero inoxidable). Posteriormente, se continuó con ciclos de humedecimiento y secado. Este proceso consistió en la exposición de las muestras a temperatura ambiente durante 15 días y sumergiéndolos durante 15 días en una solución acuosa de NaCl al 3,5%, hasta que se completaron 12 ciclos (Aguirre-Guerrero et al., 2016).

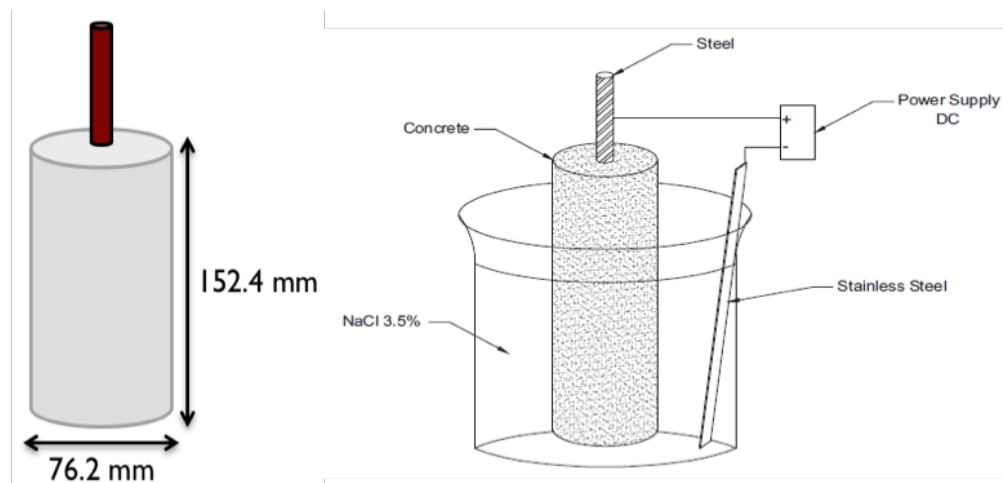


Figura 9 Montaje experimental del ensayo (Aguirre-Guerrero et al., 2016).

Uno de los resultados del ensayo, viene asociado al tiempo de exposición de la muestra y se obtuvo el resultado (Figura 10), donde se indica el tiempo de exposición y la corriente

necesaria para que las muestras puedan experimentar corrosión, además se indica el tiempo que tomó la muestra para mostrar una grieta visible.

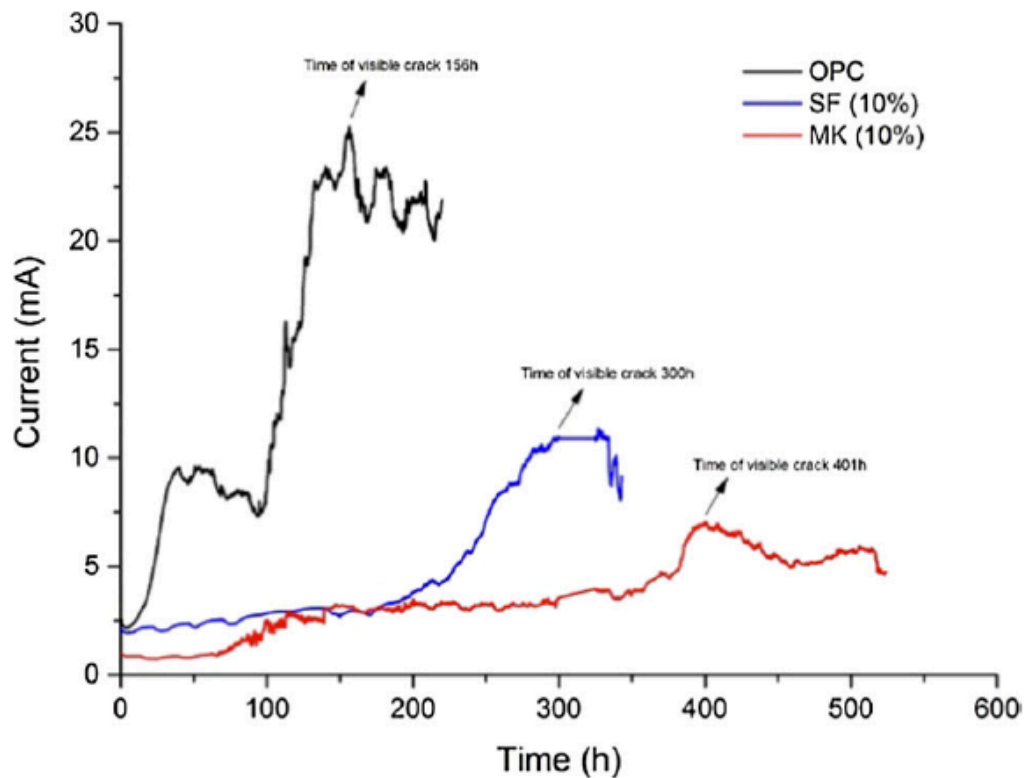
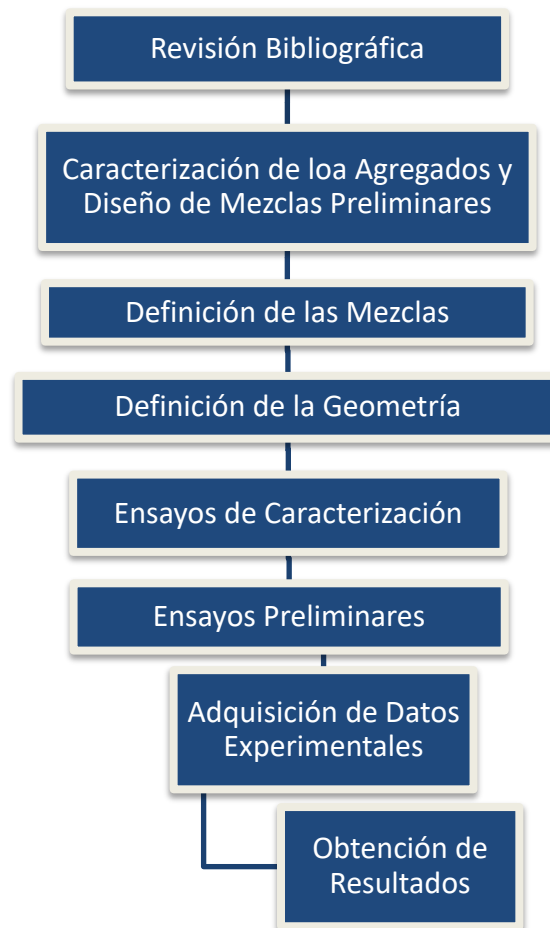


Figura 10 Prueba acelerada de corrosión (Aguirre-Guerrero et al., 2016).

5. METODOLOGÍA

A lo largo de este capítulo, se describirá el procedimiento que se siguió para alcanzar los objetivos establecidos en esta investigación. Una vez realizada la revisión bibliográfica, se pudieron establecer los ensayos y la geometría de las muestras, para caracterización física,

mecánica y por durabilidad de los diseños de mezcla del proyecto. En este último se evaluaron condiciones de exposición para simular condiciones de exposición a ion cloruro por considerar el área de interés del proyecto ubicada en la Región Caribe colombiana. En el diagrama que se presenta a continuación, se pueden apreciar las distintas fases de la metodología empleada en esta investigación.



5.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La revisión bibliográfica tuvo como base el comportamiento de concretos de altas prestaciones/resistencia ante agentes que reduzcan la vida útil de este y su comparación con concretos ordinarios, dando lugar a la importancia de esta etapa de la investigación que ayuda a registrar referencias de datos que fueron encontrados en la literatura para ser

comparados con los resultados de la investigación, es por ello que se revisaron los ensayos realizados por los autores tales como, resistencia a la compresión, velocidad de pulso ultrasónico, prueba acelerada de corrosión, resistividad, entre otros. Estos ensayos permiten establecer una caracterización de algunos parámetros de durabilidad e incluso geometría, además de las condiciones de exposición y comparación de estos resultados con concretos convencionales, para que de esta forma se pudieran sacar conclusiones de su comportamiento.

5.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS

En esta etapa de la investigación, se caracterizaron varios agregados de la Costa Caribe colombiana, con el fin de determinar sus principales propiedades físicas - mecánicas, y poder elegir los materiales para los diseños de mezcla del proyecto. Los ensayos realizados son los siguientes:

Tabla 5 Ensayos de caracterización de los agregados.

Ensayo/Propiedad del material	Norma/Estándar
Contenido de humedad de Agregados.	INV E – 207-14
Gravedad específica y absorción de agregados finos.	INV E – 222-14
Gravedad específica y absorción de agregados gruesos.	INV E – 223-14
Densidad Bulk (peso Unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados compactados y sueltos.	INV E – 217-14
Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos + Cantidad de material fino que pasa el tamiz No. 200.	INV E – 213-14/ INV E – 214-14
Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 1-1/2" por medio de la máquina de los ángeles.	INV E – 218-14

5.3 DEFINICIÓN DE LAS MEZCLAS

Después de haber caracterizado los materiales, se procedió con el diseño de mezcla siguiendo las especificaciones del método del ACI (*American Concrete Institute*) e incluso realizando combinación de agregados en algunos casos. De esta forma se obtuvieron las

proporciones que se relacionan en la Tabla 6. Una vez definidos los diseños, se procedió a realizar unas mezclas preliminares para verificar el cumplimiento de la resistencia y otros ensayos proyectados para el desarrollo de esta investigación.

Tabla 6 Diseños de mezcla empleados para la investigación.

Material (kg/m ³)	Concreto		
	f'c = 5000 psi	f'c = 7000 psi	f'c = 10000 psi
Agua	197,4	199,60	180,3
Cemento	478,8	607,4	620,8
Agregado Grueso 1	751,7	1109,6	479,4
Ingecost			
Agregado Grueso 2	-	-	562,8
Calcáreos			
Agregado Fino	907,1	585,0	415,7
Ingecost			
Humo de Sílice (SikaFume)	25,2	51,9	68,9
Viscocrete	2,30	2,40	5,50
Plasticem	-	-	2,6
A/MC	0,39	0,30	0,26

A/MC: Relación Agua/material cementante

5.4 DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA DE ESPECÍMENES DE ENSAYO

Para la definición de la geometría de los especímenes, se hizo uso de la normativa que rige cada ensayo, además se tuvieron en cuenta algunas propuestas de geometría encontradas en la revisión de literatura. Todo lo anterior con el fin de comparar resultados con otras investigaciones. A continuación, se presenta un esquema de la geometría de cada ensayo.

5.4.1 Resistencia a la compresión, resistividad, ultrasonido y absorción.

Para estos ensayos, se usaron tres (3) réplicas de un diámetro “D” de 4” (101.6 mm) y una altura “H” de 8” (203.2 mm) haciendo uso de la norma INV-E 410/14 (ASTM C39-18).

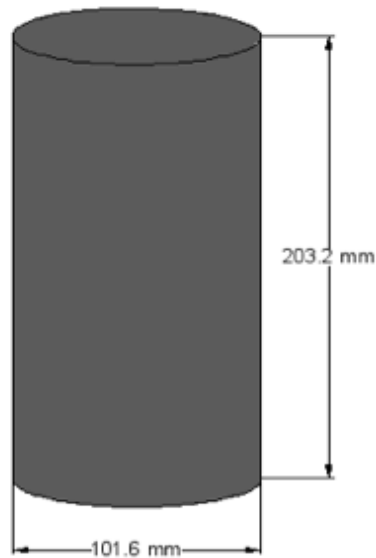


Figura 11 Geometría del ensayo de resistencia a la compresión.

5.4.2 Difusión de Ion Cloruro.

Para el ensayo de difusión de ion cloruros, se tomaron cilindros con la geometría descrita en el inciso anterior y luego de haber cumplido con el proceso de curado por veintiocho (28) días, se procedió a cortarlos en mitades y posteriormente ser pintados con un epóxico de alta resistencia química (SikaGuard 62-CO) para evitar el ingreso de cloruros por las paredes del cilindro y garantizar el transporte unidimensional a través de este.

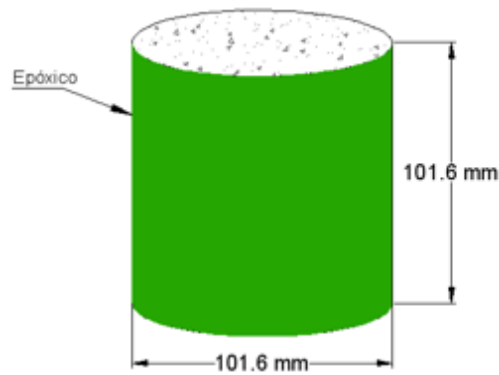


Figura 12 Geometría del ensayo de difusión de ion cloruro.

5.4.3 Ensayo Acelerado de Corrosión, Potencial de Corrosión, Espectroscopia de Impedancia Electroquímica.

Para este ensayo, se optó por cilindros de diámetro “D” de 3” ya que al tener menor diámetro que los cilindros convencionales, se reducía el tiempo de exposición de los especímenes de prueba. La geometría empleada es de un cilindro de diámetro “D” de 3” (76.2 mm) y una altura “H” de 6” (152.4 mm) con una barra colocada en el centro de 8.5 mm de diámetro pintada en un extremo y con una longitud expuesta promedio de 110 mm.

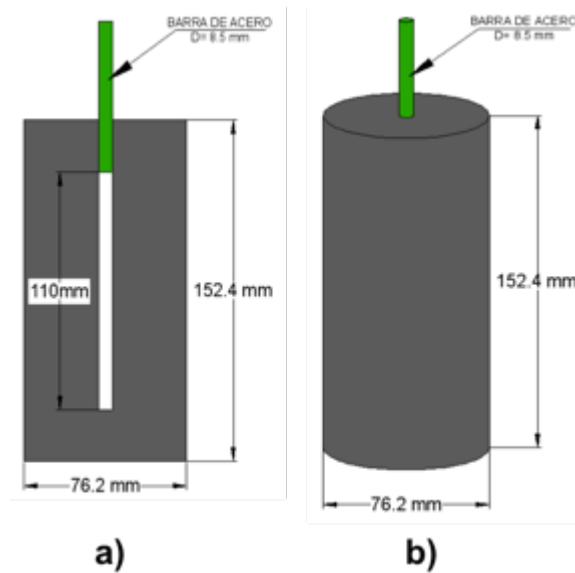


Figura 13 a) Sección transversal del cilindro con longitud expuesta de la barra b) Esquema del ensayo de Acelerado de Corrosión, Potencial de Corrosión, Espectroscopia de Impedancia Electroquímica.

5.4.4 Succión Capilar

Este ensayo se realizó de acuerdo con la norma ASTM C1585-13. Este ensayo se emplea para determinar la tasa de absorción de agua a través del concreto, midiendo el aumento en la masa de una muestra como resultado de la absorción de agua de manera unidimensional en función del tiempo. Para este ensayo, cortó en cuatro partes iguales un cilindro de 4” por 8” con el fin de obtener cuatro réplicas de cada mezcla de diseño. La geometría del espécimen es de 4” (101.6mm) de diámetro por 2” (50.8 mm) de altura.

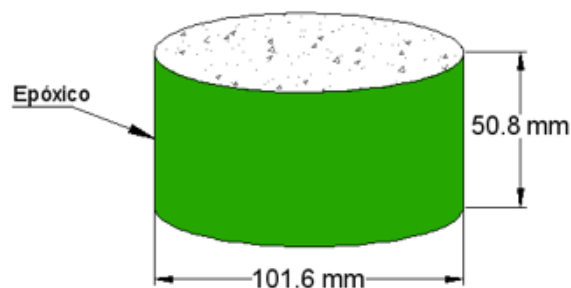


Figura 14 Esquema de la geometría del espécimen para el ensayo de succión capilar.

5.4.5 Densidad, absorción y vacíos en hormigón endurecido

Para este ensayo, se tomaron 3 réplicas de cada resistencia para realizar la respectiva evaluación de la densidad y absorción de cada tipo de concreto. Para este ensayo, la geometría usada fue la misma que se empleó para los cilindros de resistencia a la compresión (figura 11).

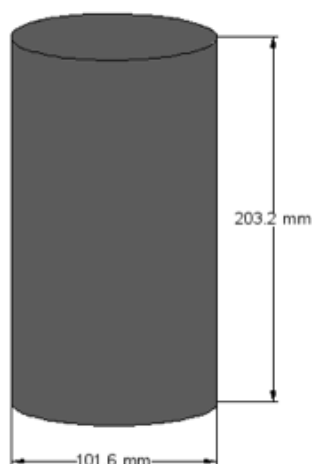


Figura 15 Geometría de los especímenes para el ensayo de densidad, absorción y vacíos.

5.4.6 Determinación de la corrosión del acero de refuerzo en diferentes mezclas de concretos expuestos a ambientes de cloruros.

Este ensayo se realizó de acuerdo con la norma ASTM G109-07, el cual se utiliza para determinar los efectos de una solución (Solución al 3% de NaCl) en la corrosión de metales embebidos en el concreto, además se instalaron unos interruptores entre el ánodo y los cátodos y entre los cátodos. La geometría empleada para este ensayo se muestra en las figuras 16 y 17:

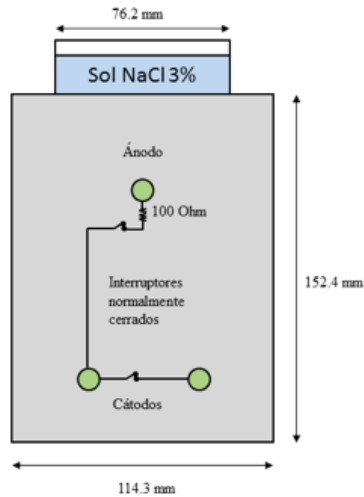


Figura 16 Ubicación de interruptores en el montaje experimental.

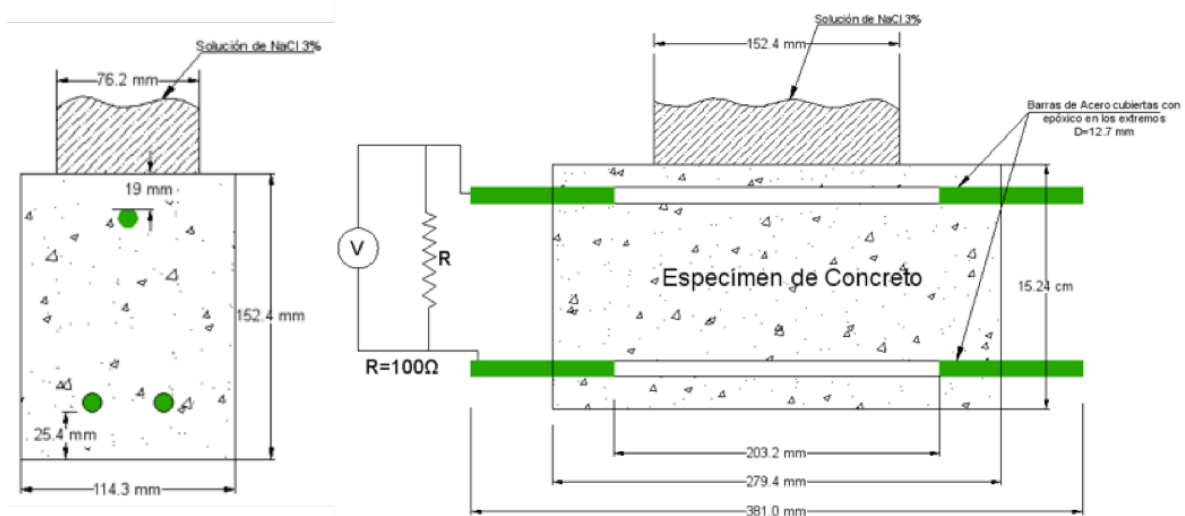


Figura 17 Esquema del Ensayo de corrosión del acero de refuerzo (ASTM G109).

Para la realización de este ensayo se pintaron las barras en los extremos dejando expuesto una longitud de 203.2 mm (8 pulgadas). De esta forma también se le aplicó un recubrimiento epóxico (SikaGuard 62-CO) a las vigas en su exterior evitando que la superficie alcance un alto grado de carbonatación.

5.5 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN

5.5.1 Resistencia a la compresión.

De acuerdo con la Norma INV-E-410 (ASTM C39-18) y una vez registrada la geometría de la muestra, se debe colocar el espécimen de concreto con sus áreas de contacto totalmente limpias para garantizar una transferencia de esfuerzos uniformes. Por otra parte, las muestras deben ensayarse una vez retiradas de la zona de curado. Una vez colocada la muestra en el equipo de compresión, se debe ajustar la velocidad de carga, correspondiente a 0.25 MPa/s.

Una vez inicie el ensayo se debe esperar hasta alcanzar la falla e identificar la carga máxima soportada por el cilindro para que de esta forma se pueda obtener el esfuerzo máximo promedio.

Luego de haber registrado la geometría del ensayo, se procede a utilizar la máquina de compresión, la cual da como resultado la carga última en kilonewtons (kN) y esta se debe dividir entre el área (A) para obtener el esfuerzo máximo promedio (ecuación 10).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (10)$$



Figura 18 Ensayo de resistencia a la compresión.

5.5.2 Resistividad.

Este ensayo está relacionado directamente con la conductividad y además es un parámetro que indica las condiciones del fraguado y de la resistencia mecánica, del grado de saturación del concreto junto con el grado de curado y de conectividad de poros de la microestructura o resistencia al ingreso de sustancias agresivas en el concreto reforzado. La norma que rige este ensayo es la *ASTM C1760*. Una vez retirada la muestra de la zona de curado, se procede a tomar las mediciones respectivas de la geometría del espécimen. Luego manteniendo húmedo el cilindro, retirando el exceso de agua en la superficie (sin dejar que se seque) se procede a montar sobre una superficie aislante y un par de platinas de acero inoxidable en las caras del cilindro con una esponja húmeda para mejorar las lecturas del equipo medidor de resistencia. Una vez realizado el montaje anterior se procede a registrar el valor de la resistencia eléctrica y la resistencia de las esponjas como se muestra en la figura 19. Para calcular la resistividad eléctrica se debe multiplicar por el área y dividir por la longitud, como se muestra en la ecuación 4.

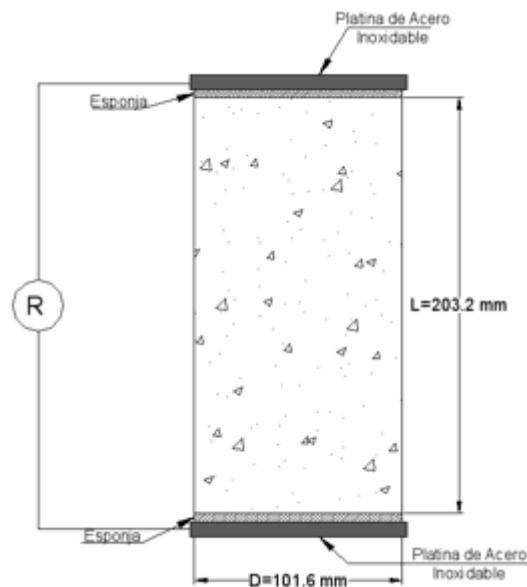


Figura 19 Esquema de medición del ensayo de resistividad.

El equipo empleado es un medidor de resistencia de dos puntos. El equipo posee una configuración de conectores para realizar las lecturas de acuerdo al esquema anterior

(Figura 20). Se realizan dos registros para realizar un promedio y se deben restar la resistencia de las esponjas para obtener la resistencia del cilindro.

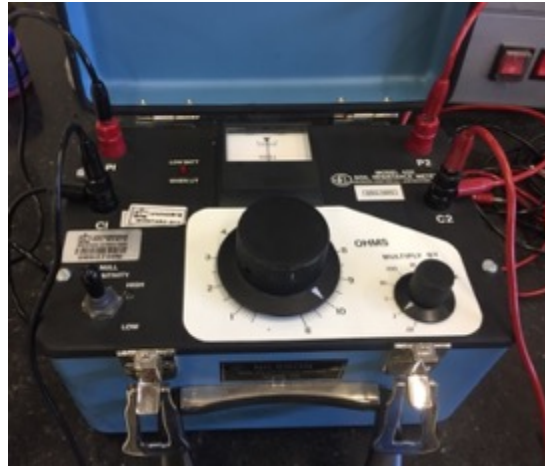


Figura 20 Configuración de las conexiones del medidor de resistencia.

5.5.3 Ultrasonido.

La norma que rige este ensayo es la *ASTM C597*, esta indica que el equipo empleado para medir el tiempo de tránsito de la onda debe ser calibrado con un patrón que permita ajustarse a un valor conocido. Una vez realizado el ajuste, se procede a medir el tiempo de tránsito de la onda a través de la muestra, con este valor y la distancia entre el emisor y el receptor, se procede a calcular la velocidad de pulso ultrasónico (ecuación 2) en el concreto. Usualmente se mide este tiempo en toda la altura del cilindro ya que es la superficie apta mejorar el contacto entre cada nodo y el concreto.

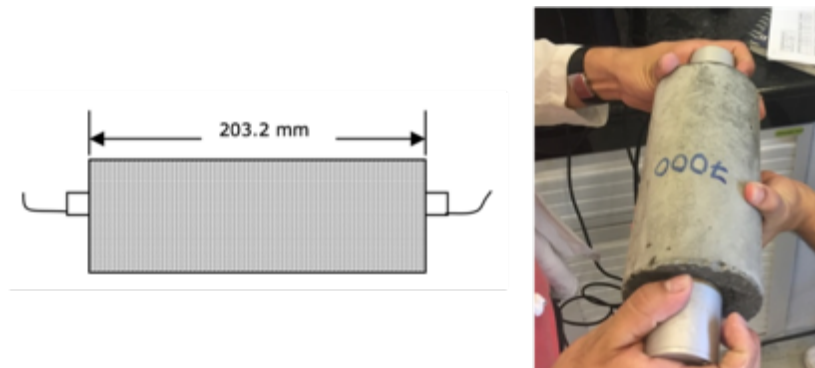


Figura 21 Esquema de medición del ensayo de ultrasonido.

5.5.4 Difusión de ion cloruro.

Con el fin de construir los perfiles de cloruros, se realizó un ensayo acelerado de penetración de cloruros en el concreto endurecido, la norma que soporta este ensayo es la *NT BUILD 443*. El procedimiento inicial fue pintar los cilindros en todas sus caras, exceptuando una de estas con el fin de garantizar el transporte de esta solución de manera unidimensional, empleando una solución de NaCl que consta de 165 gramos de NaCl por cada litro de agua destilada. Esta solución se reemplaza cada cinco (5) semanas y considerando un tiempo de exposición mínimo de 35 días.

Una vez cumplido el tiempo de exposición, se procede a cortar en discos con un espesor promedio de 1.5 cm para luego pulverizar con un método mecánico la pasta de cemento de cada disco hasta obtener 3 ± 0.1 g.

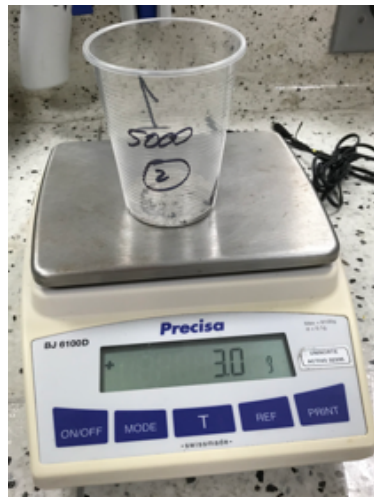


Figura 22 Registro de masa de la muestra a ensayar.

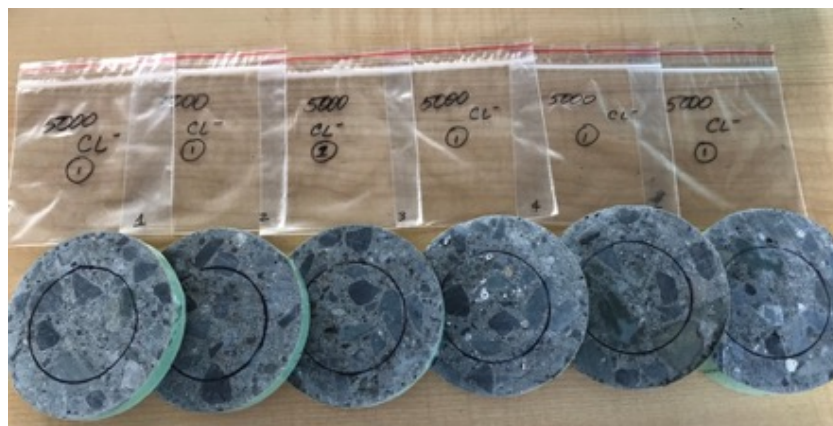


Figura 23 Área de extracción de cada disco de la muestra.

Después de haber obtenido la muestra de cada disco, se procede a evaluar el contenido de cloruros a través de un ion selectivo de cloruros. Tomando la muestra de cada disco y haciendo una mezcla de ácido nítrico y agua destilada en una proporción de 75 ml de agua destilada por cada 25 ml de ácido nítrico. El proceso realizado anteriormente se realiza con el fin de eliminar las partículas orgánicas que eventualmente pueda tener la muestra.

Luego se procede a realizar la curva de calibración, la cual corresponde a la medición del voltaje de distintas concentraciones de NaCl. Una vez construida esta curva, se procede a medir el voltaje de cada sección del cilindro; esto va a permitir interpolar estos datos en la curva de calibración y de esta forma construir el perfil de cloruros.



Figura 24 Ion selectivo de cloruros y muestra preparada.

5.5.5 Prueba Acelerada de Corrosión.

El ensayo acelerado de corrosión tiene como normativa la norma *NT BUILD 356*. Sin embargo, de acuerdo con la revisión de literatura, se replicó el ensayo con algunas modificaciones en la geometría y los parámetros del ensayo.

Para este ensayo es importante mantener el nivel del agua 30 mm por debajo de la superficie superior del cilindro. En esta configuración se debe hacer el montaje de un circuito eléctrico como el que se muestra en las figuras 25 y 26. Una platina de acero inoxidable se sumerge en una concentración de 3.5% de cloruro de sodio (NaCl) y se conecta al terminal negativo de la fuente de poder, mientras la barra de acero de 8.5 mm de diámetro, se conecta al terminal positivo con una resistencia de 100 Ω (ohmios) colocada

entre la barra y el terminal positivo de la fuente. El voltaje fue medido antes y después (diferencia de voltaje) de la resistencia para registrar los datos de voltaje en el tiempo.

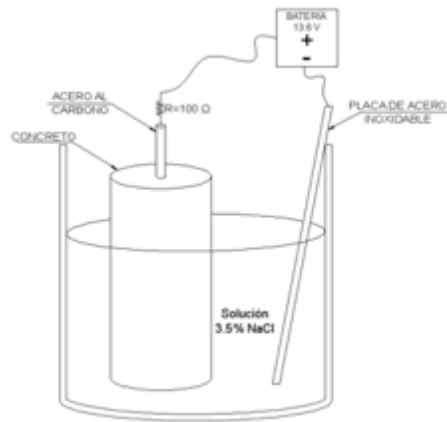


Figura 25 Esquema del montaje del ensayo acelerado de corrosión.

- a) Montaje del experimento individual (Fig. 25).
- b) Tarjeta DAQ (sistema de adquisición de datos).
- c) Equipo para registro de información.
- d) Fuente de 13.67 Voltios.
- e) Platina de acero inoxidable.

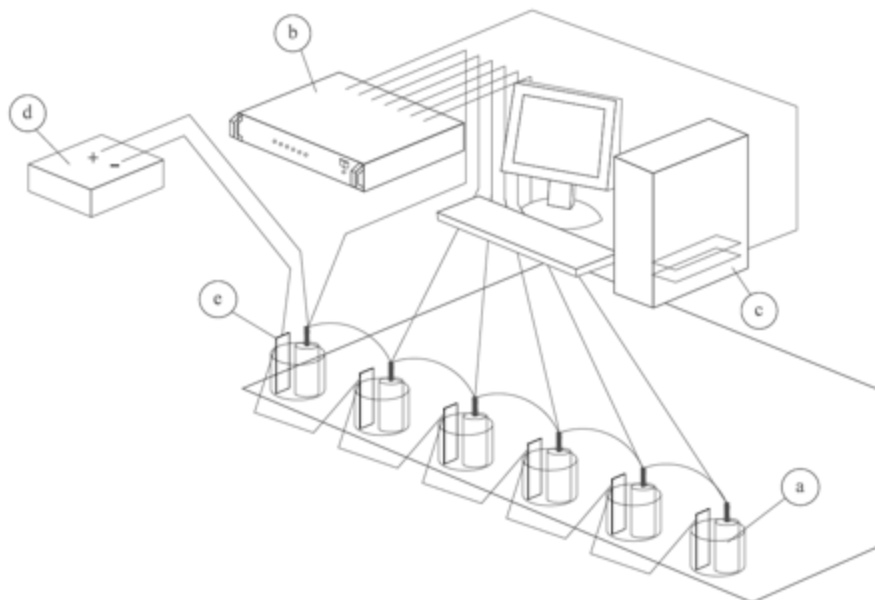


Figura 26 Montaje del ensayo acelerado de corrosión.

5.5.6 Succión Capilar

El ensayo de absorción viene dado bajo los parámetros de la norma *ASTM C1585*. Inicialmente se debe sellar la muestra alrededor, dejando los costados del diámetro expuestos para que uno de estos sea el área de contacto con el agua y el otro será sellado con una bolsa plástica y un elemento de caucho para evitar que el agua evaporable del recipiente humedezca esa zona. Una vez culminada la configuración de la muestra, se toma la masa inicial de la muestra y luego se van registrando los datos de masa en intervalos de tiempo según la normativa hasta completar 8 días de ensayo.



Figura 27 Registro de pesos de los especímenes para el ensayo de succión capilar.

Luego, se calcula la absorción inicial como la pendiente de los puntos tomados de 1 minuto a 6 horas de ensayo y el resto de los puntos sería la absorción secundaria. Para mantener el nivel del agua constante, se usó una probeta invertida para que alimente el recipiente en caso de una eventual evaporación del agua.



Figura 28 Montaje del ensayo de succión capilar.

5.5.7 Densidad, absorción y vacíos en hormigón endurecido

Para realizar este ensayo, se usó como referencia la norma *ASTM C642*, en la que se describe el procedimiento para el desarrollo de este ensayo.

Primero se coloca el espécimen durante no menos de 24 horas a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$, una vez se retira se deja que se enfríe y luego se determina la masa de la muestra seca en el horno.

Después de haber tomado la masa de la muestra seca en el horno, se debe tomar la masa saturada después de la inmersión. Esta masa se registra después de haber sumergido las muestras durante no menos de 48 horas y luego de haber retirado la humedad superficial de la muestra.

Luego se debe tomar la masa saturada después de la ebullición, colocando el espécimen en un recipiente con agua del grifo y calentarlo hasta hervir durante 5 horas, una vez se complete este período de tiempo se deja enfriar mediante pérdida natural de calor durante no menos de 14 horas, luego se retira la humedad superficial de la muestra y se determina la masa. Por último, se suspende el espécimen en una canasta para determinar la masa aparente inmersa (Figura 29).



Figura 29 Registro de la masa aparente inmersa.

5.5.8 Pérdida de masa del acero de refuerzo

Después de haber culminado el ensayo acelerado de corrosión se procedió a realizar la extracción de las barras de acero de los especímenes ensayados. Las barras de acero extraídas que hicieron parte de un proceso acelerado de corrosión fueron puestas en bolsas herméticas identificadas con el nombre de la probeta. Para realizar este ensayo, se deben seguir las recomendaciones de la norma *ASTM G1* que especifica el método que se debe emplear para la limpieza de estas barras. Se toman 150 ml de *Hidróxido de Amonio* (NH_4OH gr 0.90) por cada 1000 ml de agua destilada.

Teniendo en cuenta que cada barra tuvo que ser pesada previamente, antes de inicio del ensayo, esta debe pasar por el mismo proceso de lavado por un tiempo aproximado de 5 minutos cada una, remojando y secando para barras y registrando el peso con una balanza de precisión. Este proceso se hace por medio de ciclos hasta alcanzar poca variación entre lavados. La masa perdida de cada barra debe ser graficada en función de número de ciclos de lavados.

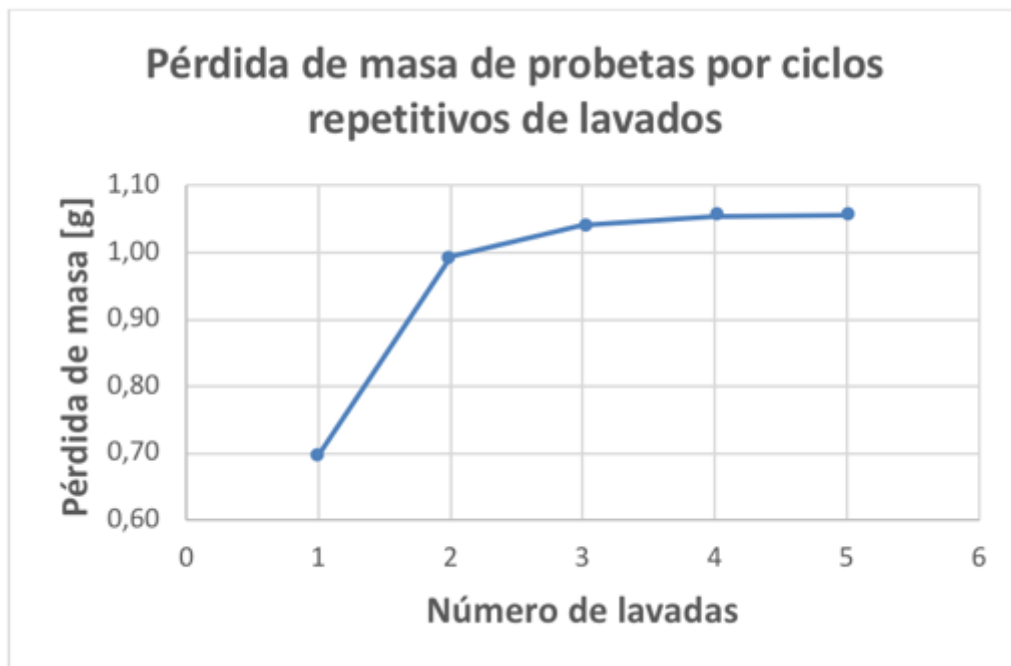


Figura 30 Representación de la pérdida de masa por ciclos de lavado.

5.5.9 Determinación de la corrosión del acero de refuerzo en diferentes mezclas de concretos expuestos a ambientes de cloruros.

Para la realización de este ensayo, se usó la norma *ASTM G109*. En este ensayo se mide la diferencia de voltaje con un voltímetro de alta precisión a través de la resistencia colocada entre el ánodo y el cátodo de una barra de acero que se encuentra expuesta ante un ambiente de cloruros (figura 31).

Este ensayo se debe monitorear hasta que la macrocelda de corrosión alcance 150 C (Coulombs). Adicional a esto se deben medir los potenciales del ánodo y del cátodo con un electrodo de referencia, en este caso se utilizó el electrodo de plata/cloruro de plata (Ag/AgCl).

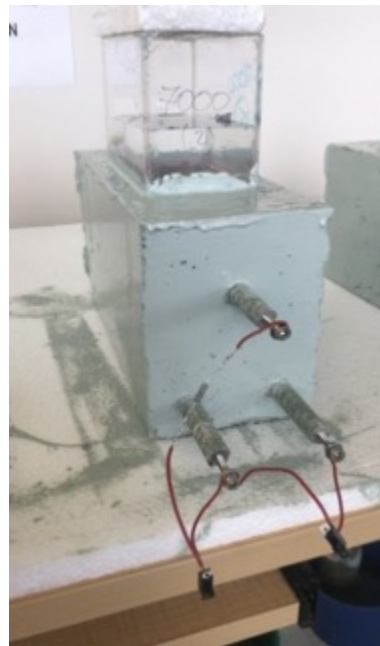
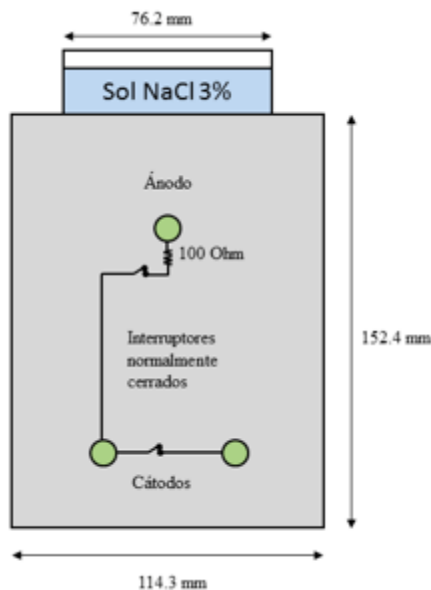


Figura 31 Esquema del ensayo de corrosión del acero de refuerzo.

5.6 ENSAYOS PRELIMINARES

Después de haber definido la geometría, se procedió a realizar los ensayos preliminares que nos permitían tener una idea anticipada del comportamiento del diseño de mezclas de los resultados de los ensayos. Además, se empleó la geometría definida para los ensayos de compresión, resistividad eléctrica, velocidad de pulso ultrasónico y la prueba acelerada de corrosión, con el fin de comparar estos resultados con los definitivos.

5.7 OBTENCIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES

En esta etapa de la investigación, se tienen en cuenta las condiciones del ensayo y de la frecuencia con que se debían tomar los datos, para que de esta forma se registrara la información correspondiente a cada ensayo. Para la mayoría de ensayos, se hizo un registro manual, exceptuando el ensayo acelerado de corrosión y el ensayo de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS).

Para el ensayo acelerado, se hizo el montaje de un circuito en paralelo con el fin de que se registraran los datos de manera simultánea y a través de un sistema de adquisición de datos se fuera almacenando esta información con una frecuencia de 10 segundos (0.1 Hz), este ensayo se realizó por un tiempo aproximado de 800 horas.

El ensayo *EIS*, se realizó empleando un potencióstato, el cual se emplea para cambiar la frecuencia de medición del ensayo. Además, posee un sistema de adquisición de datos que nos ayuda a construir las gráficas y realizar el ajuste *CPE* a los datos con el fin de obtener el valor de la resistencia a la polarización (R_p) y otros parámetros que permiten calcular la corriente de corrosión (I_{corr}).

6. RESULTADOS PRELIMINARES

Antes de iniciar con los ensayos definitivos, se realizaron unas réplicas previas de los especímenes para verificar que los diseños realizados se cumplieran. Además, se realizó el ensayo acelerado de corrosión para conocer el comportamiento de las muestras ante el voltaje emitido por la fuente e identificar el tiempo que tardan las muestras para el inicio de la corrosión. Así mismo, se realizaron los ensayos de resistividad y ultrasonido, ensayos que se encuentran en el alcance de esta investigación.

6.1. DENSIDAD

6.1.1. Mezcla de 5000 psi.

Para un concreto de peso normal, el concreto debe tener una densidad entre 2.20 y 2.40 g/cm³ (Neville, 1992). Para las mezclas de concreto en estudio, se realizó el ensayo de densidad teniendo en cuenta el peso sumergido y se obtuvieron valores dentro del rango reportado en la literatura. En promedio la densidad del concreto de 5000 psi, fue de 2.30 g/cm³. A continuación, se presentan los resultados correspondientes a la geometría y las densidades para cada uno de los especímenes de las mezclas evaluadas en el estudio.

Tabla 7 Resultado preliminar de geometría y densidad de la mezcla de 5000 psi.

ID	Días de curado	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Peso (g)	Peso Sumergido (g)	Densidad (g/cm ³)
SGR 8,1	3	100.00	203.00	3776.00	2136.00	2.30
SGR 8,2	3	101.00	204.00	3727.00	2131.00	2.34
SGR 8,3	3	101.00	204.00	3759.00	2120.00	2.29
SGR 8,4	7	100.00	204.00	3706.00	2104.00	2.31
SGR 8,5	7	101.00	203.00	3727.00	2116.00	2.31
SGR 8,6	7	101.00	203.00	3789.00	2142.00	2.30
SGR 8,7	14	101.50	204.00	3787.00	2139.00	2.30
SGR 8,8	14	101.00	204.00	3781.00	2140.00	2.30
SGR 8,9	14	101.00	203.00	3751.00	2115.00	2.29
SGR 8,10	28	102.00	204.00	3737.00	2101.00	2.28
SGR 8,11	28	102.00	205.00	3793.00	2143.00	2.30
SGR 8,12	28	101.00	204.00	3725.00	2114.00	2.31

6.1.2. Mezcla de 7000 psi.

Para la mezcla de 7000 psi, se encontraron densidades mayores que en la mezcla anterior sin embargo este valor se mantiene dentro del rango mencionado anteriormente para un concreto de peso normal. Para la medición de este parámetro, se siguió el procedimiento descrito en la sección 5.5.7. En promedio (valor calculado de 3 especímenes) la densidad del concreto de 7000 psi, fue de 2.32 g/cm³. A continuación, se presentan los resultados correspondientes a la geometría y las densidades para cada uno de los especímenes de las mezclas en estudio.

Tabla 8 Resultado preliminar de geometría y densidad de la mezcla de 7000 psi.

ID	Días de curado	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Peso (g)	Peso Sumergido (g)	Densidad (g/cm3)
SGR 6,1	3	100.80	203.00	3830.00	2179.00	2.32
SGR 6,2	3	100.00	204.00	3750.00	2136.00	2.32
SGR 6,3	3	100.90	204.00	3735.00	2128.00	2.32
SGR 6,4	7	100.90	204.00	3733.00	2126.00	2.32
SGR 6,5	7	100.20	203.00	3827.00	2180.00	2.32
SGR 6,6	7	100.60	203.00	3803.00	2166.00	2.32
SGR 6,7	14	101.20	204.00	3840.00	2199.00	2.34
SGR 6,8	14	101.50	204.00	3819.00	2139.00	2.27
SGR 6,9	14	101.20	203.00	3835.00	2198.00	2.34
SGR 6,10	28	100.10	204.00	3823.00	2179.00	2.33
SGR 6,11	28	100.30	205.00	3850.00	2196.00	2.33
SGR 6,12	28	100.40	204.00	3829.00	2185.00	2.33

6.1.3. Mezcla de 10000 psi.

Para la mezcla de 10000 psi, se encontraron densidades aún mayores que en la mezcla de 7000 psi. En promedio la densidad del concreto de 10000 psi, fue de 2.40 g/cm³, valor que describe la densidad de un concreto de peso normal. Se muestran en la Tabla 9 los datos para cada uno de los especímenes de ensayo de las mezclas del proyecto. Se aclara que en todos los casos los promedios corresponden a tres mediciones realizadas a tres especímenes de ensayo evaluados.

Tabla 9 Resultado preliminar de geometría y densidad de la mezcla de 10000 psi.

ID	Días de curado	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Peso (g)	Peso Sumergido (g)	Densidad (g/cm3)
SGR 7,1	3	100.90	203.00	3900.00	2275.00	2.40
SGR 7,2	3	100.20	205.00	3945.00	2300.00	2.40
SGR 7,3	3	100.70	203.00	3932.00	2287.00	2.39
SGR 7,4	7	100.40	205.00	3897.00	2278.00	2.41
SGR 7,5	7	100.20	207.00	3972.00	2323.00	2.41
SGR 7,6	7	100.10	205.00	3879.00	2263.00	2.40
SGR 7,7	14	100.00	205.00	3867.00	2253.00	2.40
SGR 7,8	14	100.00	204.00	3860.00	2246.00	2.39
SGR 7,9	14	100.50	206.00	3971.00	2319.00	2.40
SGR 7,10	28	100.10	204.00	3964.00	2314.00	2.40
SGR 7,11	28	100.00	206.00	3873.00	2260.00	2.40
SGR 7,12	28	100.50	206.00	3912.00	2290.00	2.41

6.2. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y ULTRASONIDO

6.2.1. Mezcla de 5000 psi.

De acuerdo con los resultados obtenidos de 12 especímenes de ensayo, se alcanzaron los siguientes porcentaje de la resistencia a los 28 días para las probetas ensayadas: Para los 3 días se alcanzó un 46%, para los 7 días un 63%, para los 14 días un 73% y a los 28 días se logró un 89% de la resistencia de diseño, mostrando una evolución en el tiempo, sin embargo a pesar de alcanzar un valor muy cercano no se alcanzó la resistencia de diseño para esta mezcla.

Con los resultados correspondientes a la velocidad de pulso ultrasónico, no se podría establecer un valor asociado directamente a la resistencia mecánica, sin embargo, se

encontró una evolución en el tiempo, lo cual es importante para realizar una correlación entre la resistencia mecánica y la velocidad de pulso ultrasónico. A continuación se presentan los resultados correspondientes a estos ensayos para los 12 especímenes de ensayo (Tabla 10).

Tabla 10 Carga última, esfuerzo último y velocidad de onda promedio de la mezcla de 5000 psi.

ID	Días de curado	Carga Última (kN)	Esfuerzo Último (MPa)	Esfuerzo Último (psi)	Promedio Tiempo (μs)	Velocidad de Onda (m/s)
SGR 8,1	3	127.30	15.83	2295.35	52.33	3878.98
SGR 8,2	3	123.50	15.51	2248.95	52.63	3875.87
SGR 8,3	3	130.40	16.21	2350.45	52.37	3895.61
SGR 8,4	7	176.70	22.04	3195.80	49.67	4107.38
SGR 8,5	7	167.70	20.93	3034.85	50.50	4019.80
SGR 8,6	7	172.30	21.94	3181.30	49.47	4103.77
SGR 8,7	14	199.90	24.71	3582.95	49.30	4137.93
SGR 8,8	14	206.20	25.73	3730.85	49.23	4143.53
SGR 8,9	14	203.70	25.43	3687.35	49.27	4120.43
SGR 8,10	28	261.90	32.06	4648.70	48.70	4188.91
SGR 8,11	28	250.90	30.70	4451.50	48.80	4200.82
SGR 8,12	28	238.70	29.79	4319.55	48.53	4203.30

6.2.2. Mezcla de 7000 psi.

De acuerdo con los resultados obtenidos en este ensayo de los 12 especímenes de concreto, se puede concluir que con respecto a la resistencia a los 28 días lo siguiente: a los 3 días la mezcla alcanzó un 62%, a los 7 días un 75%, a los 14 días un 86% y a los 28 días un 95% de la resistencia de diseño. Para esta mezcla, nuevamente el valor es cercano, sin embargo no se alcanzó la resistencia de diseño. Sin embargo, los resultados de ultrasonido alcanzaron

valores que muestran una buena calidad del concreto (tabla No. 1). Al igual que en la mezcla anterior, se encontraron velocidades de onda con una tendencia al aumento en la cual identificamos que el proceso de curado va mejorando la calidad de la mezcla. A continuación, se presentan los resultados correspondientes a estos ensayos (tabla 11).

Tabla 11 Carga última, esfuerzo último y velocidad de onda promedio de la mezcla de 7000 psi.

ID	Días de curado	Carga Última (kN)	Esfuerzo Último (MPa)	Esfuerzo Último (psi)	Promedio Tiempo (μs)	Velocidad de Onda (m/s)
SGR 6,1	3	241.50	30.27	4389.15	50.90	3988.21
SGR 6,2	3	235.40	29.97	4345.65	50.20	4063.75
SGR 6,3	3	231.80	28.99	4203.55	50.07	4074.57
SGR 6,4	7	271.50	33.96	4924.20	47.50	4294.74
SGR 6,5	7	293.70	37.24	5399.80	49.40	4109.31
SGR 6,6	7	295.30	37.10	5379.50	48.30	4202.90
SGR 6,7	14	335.50	41.71	6047.95	46.37	4399.71
SGR 6,8	14	332.00	41.84	6066.80	48.87	4174.62
SGR 6,9	14	324.10	40.29	5842.05	48.33	4200.00
SGR 6,10	28	364.60	46.33	6717.85	45.80	4454.15
SGR 6,11	28	371.10	46.97	6810.65	46.83	4377.22
SGR 6,12	28	348.50	44.02	6382.90	46.73	4365.19

6.2.3. Mezcla de 10000 psi.

Por último, el ensayo de resistencia a la compresión correspondiente a los especímenes de ensayo para la mezcla de 10000 psi registró que con respecto a la resistencia a los 28 días, a los 3 días se alcanzó un 70%, a los 7 días un 82%, a los 14 días un 92% y a los 28 días un 100% de la resistencia de diseño. Para esta mezcla se alcanzó completamente la resistencia de diseño, además, los resultados de ultrasonido mostraron valores altos que evidencian

una calidad de buena a excelente según el criterio descrito en la tabla No. 1. A continuación se presentan los resultados correspondientes a estos ensayos (tabla 12).

Tabla 12 Carga última, esfuerzo último y velocidad de onda promedio de la mezcla de 10000 psi.

ID	Días de curado	Carga Última (kN)	Esfuerzo Último (MPa)	Esfuerzo Último (psi)	Promedio Tiempo (μs)	Velocidad de Onda (m/s)
SGR 7,1	3	366.90	45.88	6652.60	50.40	4027.78
SGR 7,2	3	385.30	48.86	7084.70	49.10	4175.15
SGR 7,3	3	390.70	49.06	7113.70	50.03	4057.30
SGR 7,4	7	415.00	52.42	7600.90	47.03	4358.61
SGR 7,5	7	466.70	59.19	8582.55	45.83	4516.36
SGR 7,6	7	458.30	58.24	8444.80	46.33	4424.46
SGR 7,7	14	495.50	63.08	9146.60	47.20	4343.22
SGR 7,8	14	488.60	62.21	9020.45	46.30	4406.05
SGR 7,9	14	521.80	65.78	9538.10	44.57	4622.29
SGR 7,10	28	557.30	69.56	10086.20	46.53	4383.95
SGR 7,11	28	540.60	68.83	9980.35	45.67	4510.95
SGR 7,12	28	538.40	67.87	9841.15	45.53	4524.16

6.3. RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL CONCRETO

De acuerdo con el procedimiento descrito en la sección 5.5.2, se registran dos valores de resistencia del concreto por edad del espécimen de ensayo, con el fin de realizar un promedio de los datos. Además, se registra la resistencia de las esponjas con el fin de conocer la resistencia de la muestra. Una vez registrada esta información, se procede a calcular la resistividad con la ecuación 4. A continuación, se presentan los resultados de las mezclas preliminares, con su respectiva gráfica donde se identifica la evolución de este parámetro a través del tiempo.

6.3.1. Mezcla de 5000 psi.

Para la realización de este ensayo se empleó el método de los dos puntos, donde los resultados obtenidos por cada edad, tuvieron poca variación. Se obtuvo un promedio de 1,76 kΩ-cm para los 3 días, 2,51 kΩ-cm a los 7 días, 3,82 kΩ-cm a los 14 días y 8,19 kΩ-cm a los 28 días.

Tabla 13 Resultados preliminares de resistividad eléctrica de la mezcla de 5000 psi.

ID	Resistencia Rs #1 [Ω]	Resistencia Rs #2 [Ω]	Resistencia Promedio [Ω]	Resistencia esponja Superior e Inferior [Ω]		Resistencia Bulk [Ω]	Resistividad [kΩ-cm]
SGR 8,1	550	560	555	32	65	458	1,781
SGR 8,2	550	540	545	32	65	448	1,768
SGR 8,3	540	540	540	32	65	443	1,740
SGR 8,4	830	830	830	103	47	680	2,593
SGR 8,5	790	790	790	103	47	640	2,501
SGR 8,6	770	770	770	103	47	620	2,435
SGR 8,7	1100	1100	1100	47	71	982	3,914
SGR 8,8	1100	1100	1100	47	71	982	3,857
SGR 8,9	1000	1100	1050	47	71	932	3,678
SGR 8,10	2100	2100	2100	83	38	1979	7,966
SGR 8,11	2100	2100	2100	83	38	1979	7,850
SGR 8,12	2300	2400	2350	83	38	2229	8,754

Estos resultados serán correlacionados con el parámetro de resistencia a la compresión con el fin de proyectar a través de este ensayo, las propiedades mecánicas del concreto. De acuerdo con el criterio de la tabla 2, esta mezcla posee una alta probabilidad de corrosión.

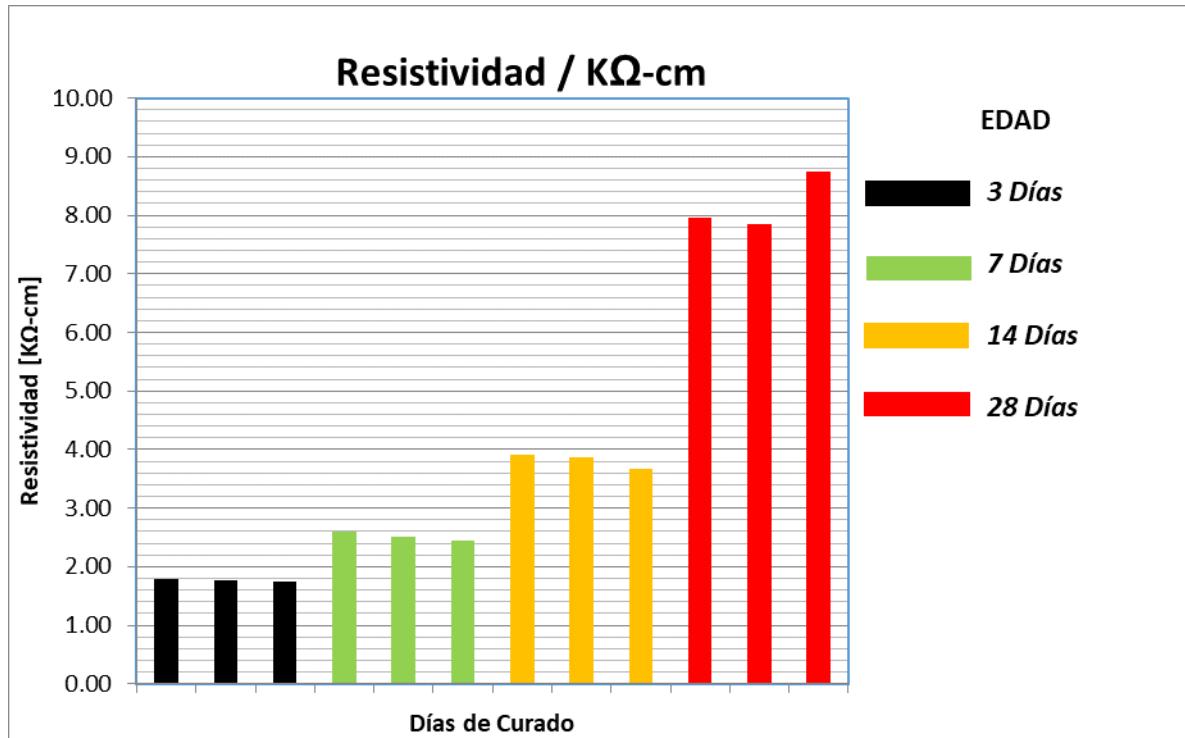


Figura 32 Resultado de resistividad mezcla de 5000 psi.

6.3.2. Mezcla de 7000 psi.

Para esta mezcla se obtuvieron valores mayores que en la mezcla anterior, evidentemente por el aumento en la resistencia a la compresión. Los resultados obtenidos en promedio fueron de 2,78 kΩ-cm para los 3 días, 3,89 kΩ-cm a los 7 días, 6,24 kΩ-cm a los 14 días y 10,60 kΩ-cm a los 28 días. Para esta mezcla se sigue viendo una evolución en el tiempo, lo que muestra los índices de calidad del concreto en el tiempo.

Tabla 14 Resultados preliminares de resistividad eléctrica de la mezcla de 7000 psi.

ID	Resistencia Rs #1 [Ω]	Resistenci a Rs #2 [Ω]	Resistencia Promedio [Ω]	Resistencia esponja Superior e Inferior [Ω]		Resistencia Bulk [Ω]	Resistividad [k Ω -cm]
SGR 6,1	680	690	685	2,4	2,7	679,9	2,673
SGR 6,2	710	740	725	2,4	2,7	719,9	2,772
SGR 6,3	740	740	740	2,4	2,7	734,9	2,881
SGR 6,4	1000	1000	1000	2,6	3	994,4	3,898
SGR 6,5	1000	1000	1000	2,6	3	994,4	3,863
SGR 6,6	1000	1000	1000	2,6	3	994,4	3,894
SGR 6,7	1600	1600	1600	2,3	3,7	1594	6,285
SGR 6,8	1500	1600	1550	2,3	3,7	1544	6,124
SGR 6,9	1600	1600	1600	2,3	3,7	1594	6,316
SGR 6,10	2800	2700	2750	1,5	4,1	2744,4	10,587
SGR 6,11	2800	2800	2800	1,5	4,1	2794,4	10,770
SGR 6,12	2700	2700	2700	1,5	4,1	2694,4	10,457

Estos resultados serán correlacionados con los de resistencia a la compresión, con el fin de realizar la proyección asociado al comportamiento mecánico de las mezclas del proyecto.

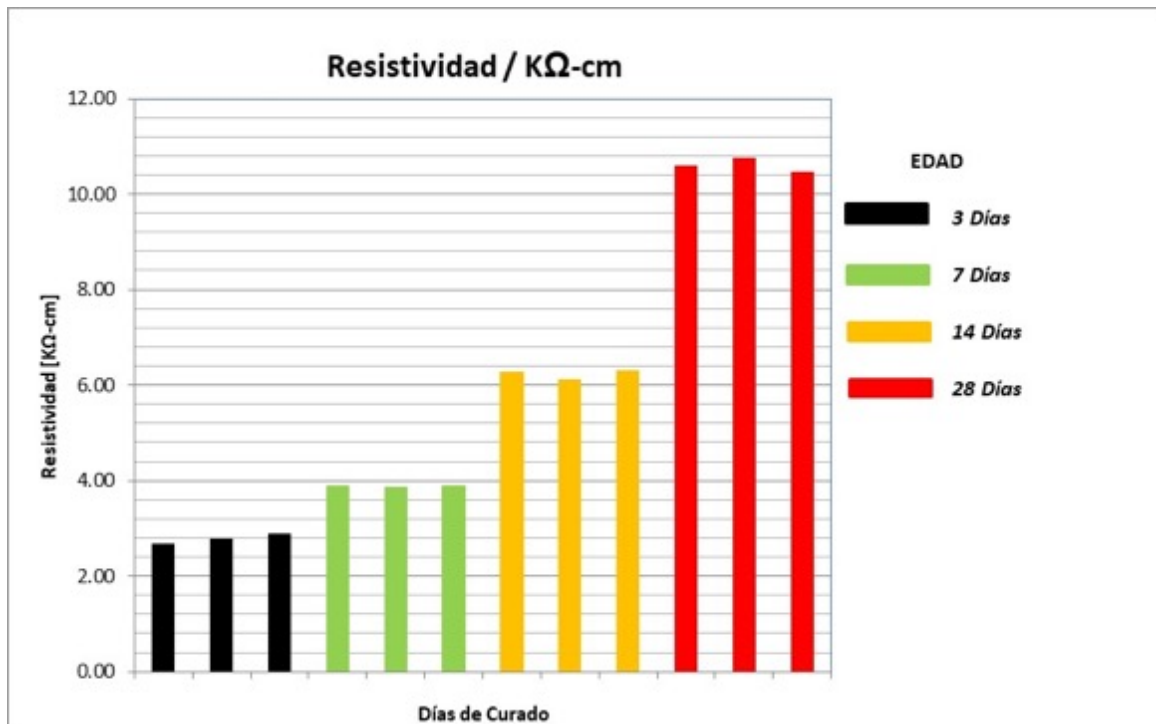


Figura 33 Resultado de resistividad mezcla de 7000 psi.

6.3.3. Mezcla de 10000 psi

Los resultados de resistividad para esta mezcla fueron altos como se esperaba. Los resultados obtenidos en promedio fueron de 2,73 kΩ-cm para los 3 días, 12,13 kΩ-cm a los 7 días, 20,67 kΩ-cm a los 14 días y 44,77 kΩ-cm a los 28 días. Los resultados obtenidos para esta mezcla son mayores a las mezclas anteriores dado que el factor cemento es alto y por ende el refinamiento en la red de poros del concreto se espera es mayor aumentando la resistividad del concreto a las edades evaluadas.

Tabla 15 Resultados preliminares de resistividad eléctrica de la mezcla de 10000 psi.

ID	Resistencia Rs #1 [Ω]	Resistencia Rs #2 [Ω]	Resistencia Promedio [Ω]	Resistencia esponja Superior e Inferior [Ω]		Resistencia Bulk [Ω]	Resistividad [k Ω -cm]
SGR 7,1	700	730	715	2,8	3,2	709	2,793
SGR 7,2	720	750	735	2,8	3,2	729	2,804
SGR 7,3	670	670	670	2,8	3,2	664	2,605
SGR 7,4	3100	3100	3100	1,7	2,6	3095,7	11,955
SGR 7,5	3300	3300	3300	1,7	2,6	3295,7	12,555
SGR 7,6	3100	3100	3100	1,7	2,6	3095,7	11,884
SGR 7,7	5300	5100	5200	2,1	4,6	5193,3	19,897
SGR 7,8	5700	5600	5650	2,1	4,6	5643,3	21,727
SGR 7,9	5200	5400	5300	2,1	4,6	5293,3	20,384
SGR 7,10	11000	12000	11500	4,1	6,1	11489,8	44,324
SGR 7,11	12000	11000	11500	4,1	6,1	11489,8	43,806
SGR 7,12	12000	12000	12000	4,1	6,1	11989,8	46,171

Los valores de resistividad mencionados tuvieron aumentos importantes de acuerdo con el período de curado, los porcentajes fueron 300% de 3 a 7 días, 70% de 7 a 14 días y 100% de 14 a 28 días. Esto muestra una evolución en el tiempo en los resultados por edad, es por

ellos que estos resultados pueden ser usados para generar expresiones que permitan correlacionar este parámetro con la resistencia mecánica del concreto.

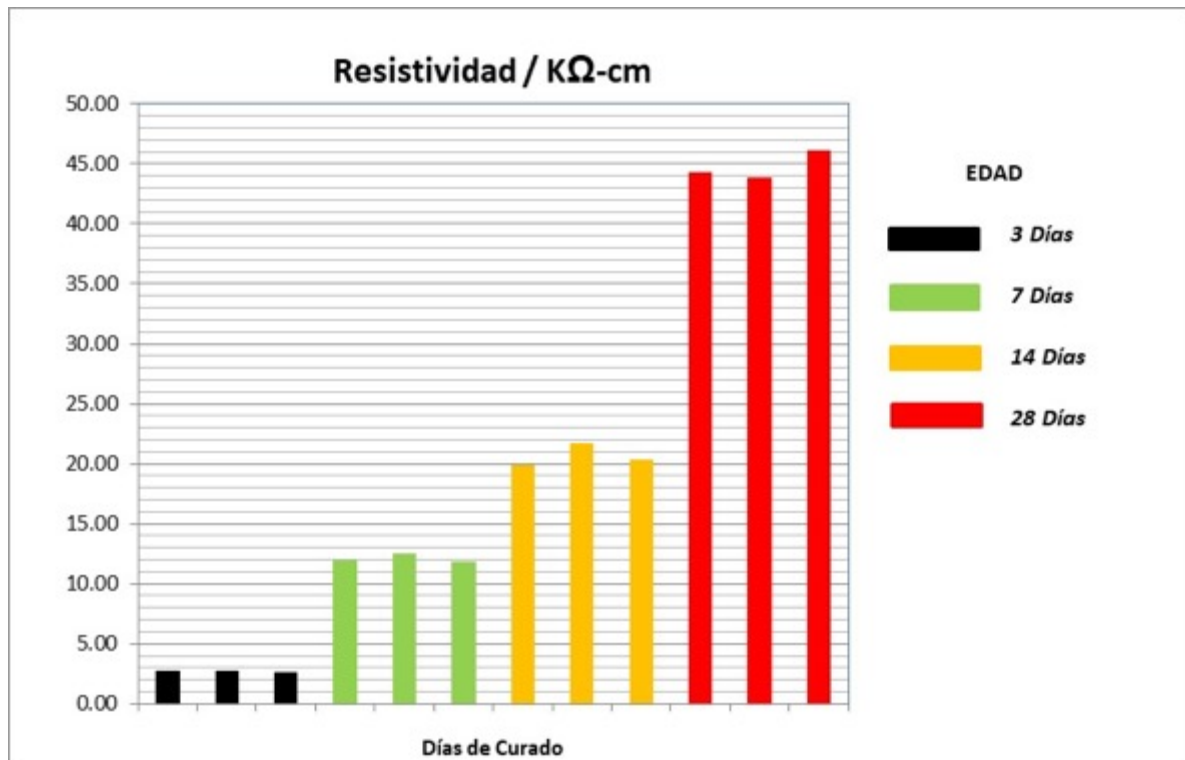


Figura 34 Resultado de resistividad mezcla de 10000 psi.

6.4. PRUEBA ACELERADA DE CORROSIÓN.

Para este ensayo, se realizó el montaje con la geometría de acuerdo con la sección 5.5.5, con el fin de verificar el comportamiento de estas muestras ante este ensayo acelerado. El objetivo de este ensayo en esta etapa preliminar era calibrar el ensayo para aplicar en las mezclas definitivas en cuanto a definir el voltaje a ser aplicado, tiempo promedio de ejecución, entre otros parámetros. Con los resultados del ensayo se pueden preparar las gráficas como se muestran en la Figura 35. En estas se puede ver la evolución del voltaje en el tiempo (en horas) y con el cual se puede identificar el tiempo de inicio de la corrosión y el tiempo de aparición de grietas en el espécimen de concreto. Esto lo podemos identificar en la gráfica cuando existe un cambio significativo en el voltaje (Figura 35). A continuación, se presenta el ensayo por un período de 420 horas (17.5 días), mostrando inicialmente un

voltaje con poca variación y luego cuando inicia la corrosión, se observa un cambio considerable en el voltaje y por ende corriente demandada por el sistema.

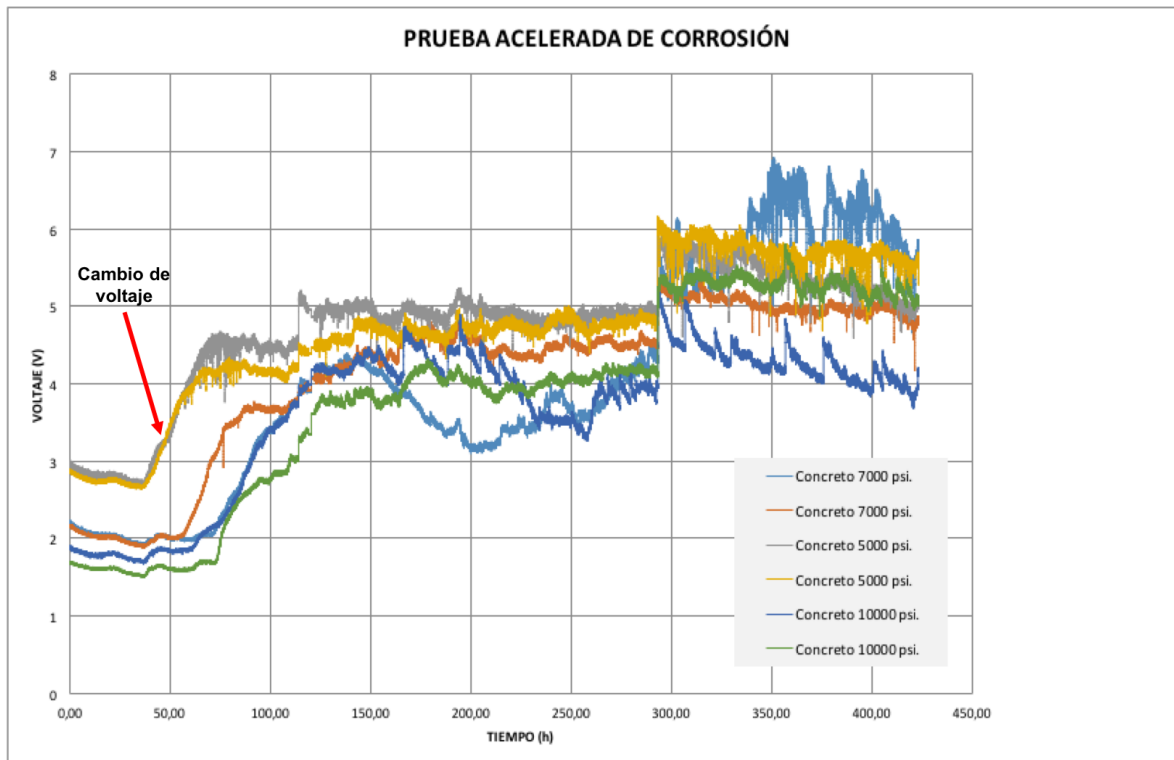


Figura 35 Resultado preliminar del ensayo acelerado de corrosión.

Inicialmente se observó que las mezclas de 5000 psi tuvieron un cambio significativo del voltaje, dando inicio a la primera grieta visible. Para las mezclas de 7000 y 10000 psi, no se pudo identificar la diferencia del cambio de voltaje ya que ocurrió casi al mismo tiempo. Luego de haber iniciado el proceso de corrosión, la mezcla de 5000 psi, empieza a experimentar una gran variación del voltaje, esto ocurre cuando la grieta en el espécimen es muy grande (~5mm) y empieza a ingresar la solución directamente hacía la barra de refuerzo (Aguirre-Guerrero et al. 2016).

7. RESULTADOS

Con los diseños de mezcla elaborados y ajustados en la etapa preliminar se elaboraron las mezclas definitivas de las diferentes mezclas seleccionadas en este estudio: para concretos de mediana y alta resistencia. En esta sección se presentan los resultados de cada uno de los ensayos de caracterización física, mecánica y por durabilidad ejecutados a las mezclas definitivas:

7.1. DENSIDAD, ABSORCIÓN Y VACÍOS EN HORMIGÓN ENDURECIDO

De acuerdo con la normativa, este ensayo muestra algunos parámetros importantes para el desarrollo de esta investigación. Se emplearon 3 réplicas por cada mezcla y para obtener varios resultados de estos parámetros.

7.1.1. Absorción después de la inmersión

La porosidad del concreto está relacionada directamente con la capacidad de absorción de agua que tienen los agregados. Este valor se encuentra relacionado con el número y tamaño de los poros y de la interconexión que exista entre los mismos. La porosidad está asociada a la capacidad de absorción de agua u otro líquido que tienen los agregados.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la mezcla de 5000 psi registró valores ligeramente similares, en promedio 7,46% de absorción. Por otra parte, el valor de la absorción para el concreto de 7000 psi fue en promedio de 6,45%, siendo este valor menor que el concreto de 5000 psi. Sin embargo, se esperaba que el resultado para la mezcla de 10000 psi fuera inferior al de las mezclas anteriores, sin embargo se obtuvo un valor promedio de 8,32%.

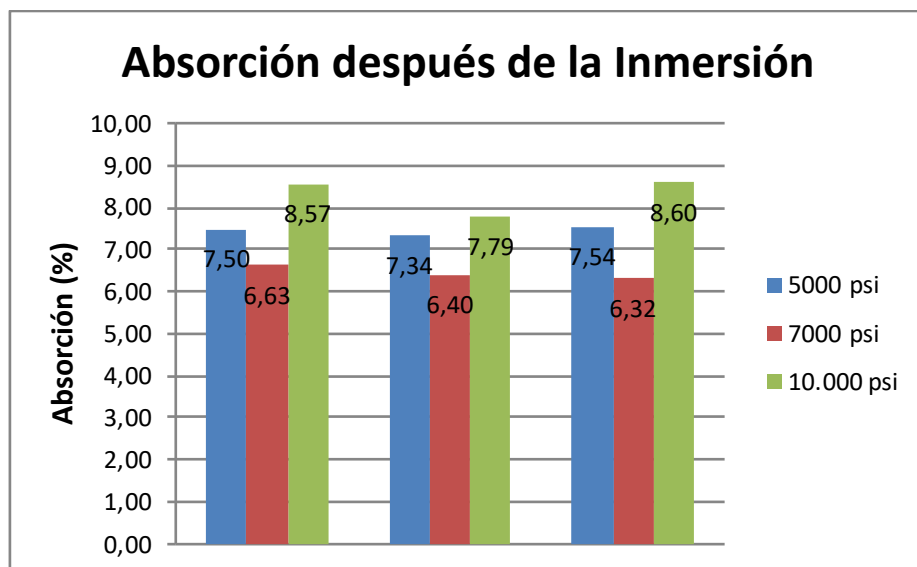


Figura 36 Absorción después de la inmersión en función de la resistencia a la compresión

7.1.2. Absorción después de inmersión y ebullición

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, la mezcla de 5000 psi registró valores muy parecidos, en promedio 7,53% de absorción después de inmersión y ebullición. Por otra parte el valor de la absorción para el concreto de 7000 psi fue en promedio de 6,40%, siendo este valor menor que el concreto de 5000 psi. Para la mezcla de 10000 psi, se esperaba una reducción en el valor de este parámetro ya que al ser un concreto de mayor resistencia mecánica, se espera que la red de poros se encuentre más interconectada, dando espacio a los vacíos del hormigón. El valor promedio que se obtuvo fue de 8,52%.

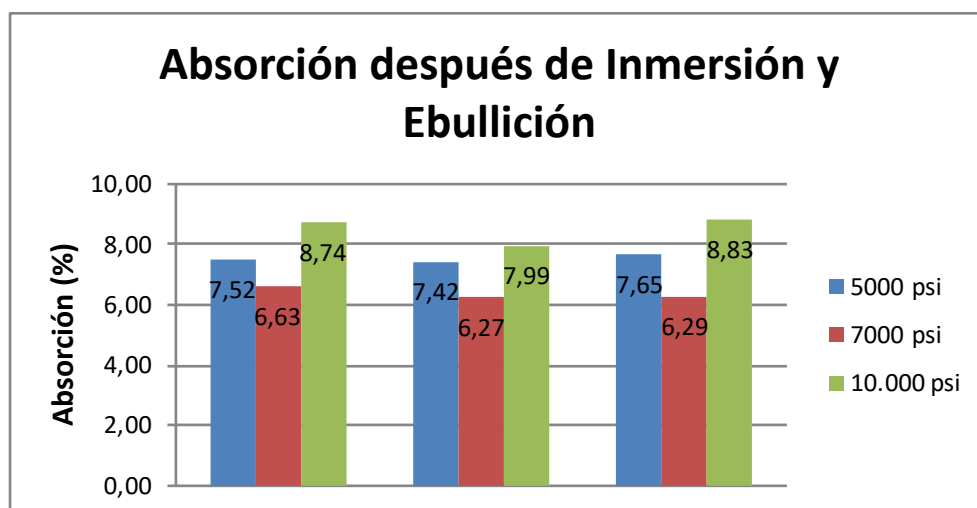


Figura 37 Absorción después de la inmersión y la ebullición en función de la resistencia a la compresión

7.1.3. Densidad bulk seca

El parámetro de densidad bulk seca se muestra en la figura que se encuentra a continuación. Para la mezcla de 5000 psi se obtuvo un resultado promedio de $2,20 \text{ g/cm}^3$. Para la mezcla de 7000 psi se obtuvo un resultado promedio de $2,23 \text{ g/cm}^3$ y la mezcla de 10000 psi registró un valor de $2,13 \text{ g/cm}^3$.

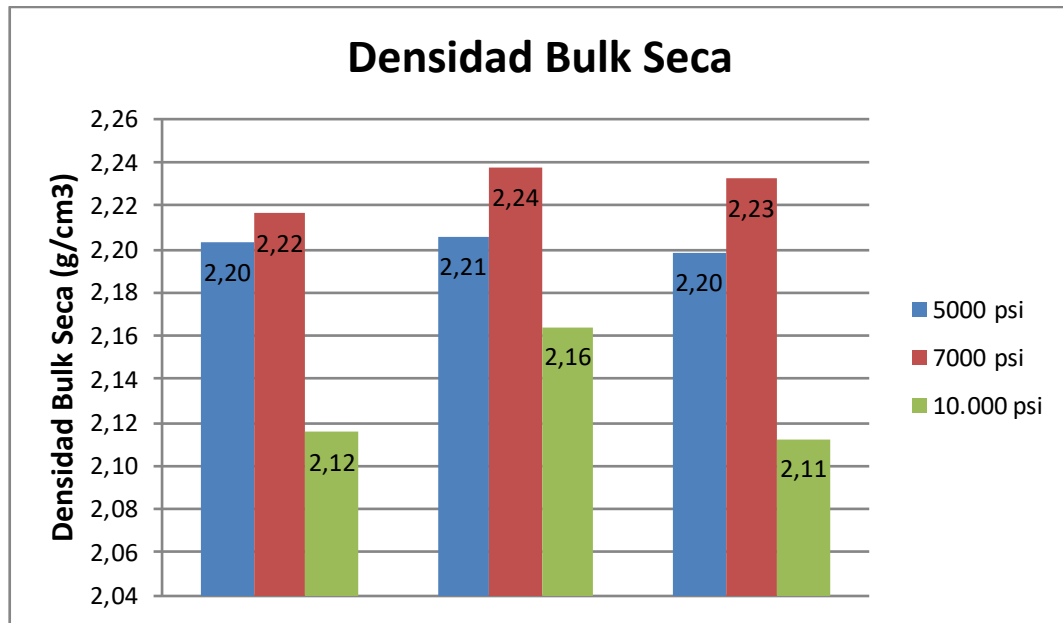


Figura 38 Densidad bulk seca para las mezclas.

7.1.4. Densidad bulk después de inmersión

El parámetro de densidad bulk después de la inmersión muestra la misma tendencia de la densidad bulk seca, a continuación, se presentan los resultados correspondientes a la densidad bulk después de la inmersión. Para la mezcla de 5000 psi se obtuvo un resultado promedio de $2,37 \text{ g/cm}^3$. Para la mezcla de 7000 psi se obtuvo un resultado promedio de $2,37 \text{ g/cm}^3$ y la mezcla de 10000 psi registró un valor de $2,31 \text{ g/cm}^3$.

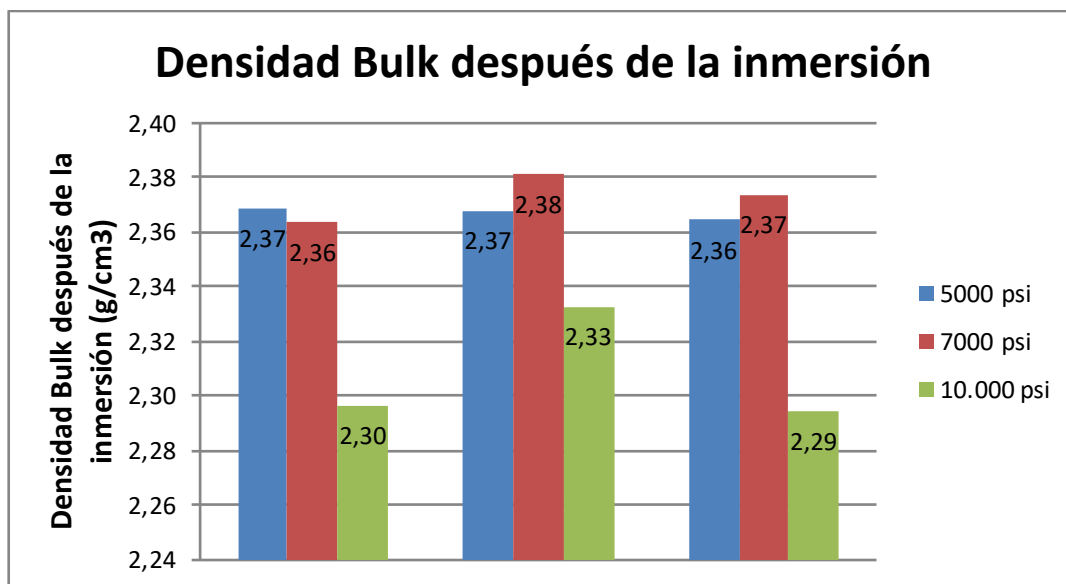


Figura 39 Densidad bulk después de la inmersión en función de la resistencia a la compresión

7.1.5. Densidad bulk después de inmersión y ebullición

La densidad aparente relaciona el peso y el volumen de las partículas de ese material teniendo en cuenta el volumen de poros, sin importar si son o no saturables. Para las mezclas de 5000 y 7000 psi, se encuentra un valor en promedio de 2,37 g/cm³. Por otra parte, la mezcla de 10000 psi tuvo un valor en promedio de 2,31 g/cm³. A continuación se presentan los resultados correspondientes a la densidad bulk después de inmersión y ebullición.

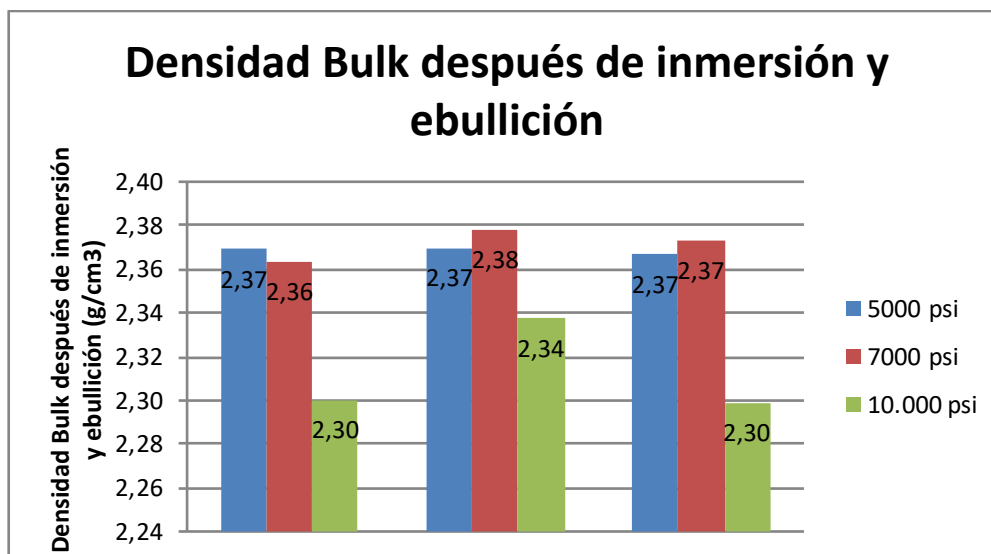


Figura 40 Densidad bulk después de la inmersión y ebullición en función de la resistencia a la compresión

7.1.6. Densidad Aparente

La densidad aparente relaciona el peso y el volumen de las partículas de ese material teniendo en cuenta el volumen de poros, sin importar si son o no saturables. Para la mezcla de 5000 psi, se encuentra un valor en promedio de $2,64 \text{ g/cm}^3$. Por otra parte, las mezclas de 7000 y 10000 psi tuvieron un valor en promedio de $2,60 \text{ g/cm}^3$. A continuación se presentan los resultados correspondientes a la densidad aparente.

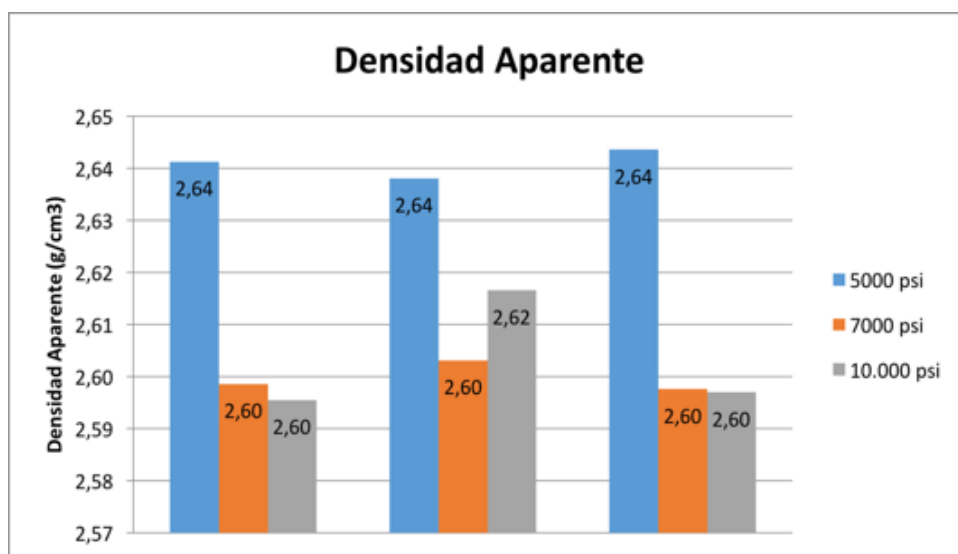


Figura 41 Densidad aparente en función de la resistencia a la compresión

7.1.7. Volumen permeable del espacio de poros

De acuerdo con los resultados, este parámetro resulta importante debido a que se identifica el volumen de vacíos que posee la mezcla, se espera que la mezcla de mayor resistencia tenga menor volumen de vacíos. La mezcla de 5000 psi tiene como promedio de este parámetro de 16,59%, para la mezcla de 7000 psi se obtuvo un 14,26% y la mezcla de 10000 psi se obtuvo un valor que no coincide con lo esperado.

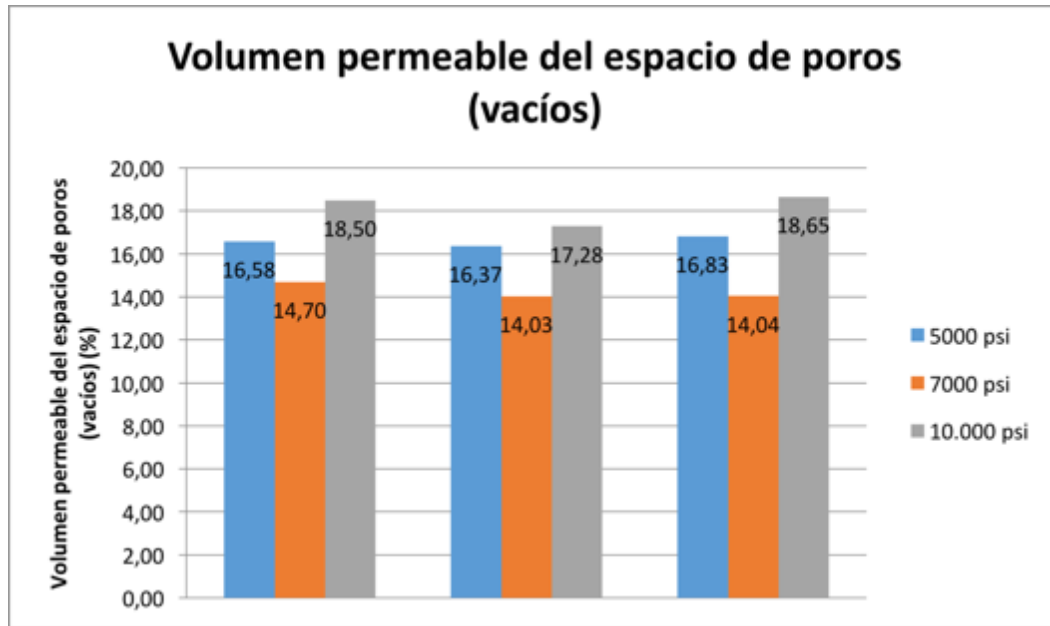


Figura 42 Volumen de vacíos en función de la resistencia a la compresión

7.1.8. Densidad.

A continuación, se presenta la geometría, el peso y la densidad de los especímenes de concreto, estos datos fueron registrados a distintas edades y con equipos de precisión en el Laboratorio de Geotecnia y Materiales de Construcción de la Universidad del Norte. Para estas mezclas se elaboraron 14 cilindros los cuales fueron ensayados a 7, 14, 28, 56 y 90 días. Esto con el fin de evaluar la evolución de cada una de las propiedades de las mezclas con la edad de curado de los especímenes. Para realizar estas mediciones, las muestras fueron retiradas del área de curado y debidamente secadas para obtener los resultados registrados en las siguientes tablas.

7.1.9. Mezcla de 5000 psi.

Para la mezcla definitiva de 5000 psi, se calculó la densidad de los 14 especímenes de concreto, la cual dio en promedio 2.40 g/cm^3 , estando esta densidad dentro del rango entre 2.20 y 2.40 g/cm^3 según Neville, 1992. A continuación se presentan los resultados de las mezclas definitivas de 5000 psi.

Tabla 16 Resultado de geometría y densidad para la mezcla de 5000 psi.

ID	Días de curado	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Peso (g)	Densidad (g/cm3)
RC-1	7	100.0	202.0	3894	2.45
RC-2	7	100.0	201.0	3934	2.49
RC-3	7	100.0	202.0	3910	2.46
RC-4	14	100.0	204.0	3818	2.38
RC-5	14	100.1	205.0	3911	2.42
RC-6	14	100.1	203.0	3881	2.43
RC-7	28	102.0	204.0	3899	2.34
RC-8	28	101.0	204.0	3900	2.39
RC-9	28	102.0	203.0	3906	2.35
RC-10	56	101.0	206.0	3951	2.39
RC-11	56	102.0	204.0	3922	2.35
RC-12	56	101.0	203.0	3906	2.40
RC-13	90	101.0	202.0	3936	2.43
RC-14	90	103.0	204.0	3919	2.31

7.1.10. Mezcla de 7000 psi.

Para la mezcla definitiva de 7000 psi, se calculó la densidad de cada uno de los 14 especímenes de ensayo, el resultado promedio fue 2.32 g/cm^3 , estando esta densidad dentro del rango entre 2.20 y 2.40 g/cm^3 según (Neville, 1992). A continuación, se presentan los resultados de las mezclas definitivas de 7000 psi.

Tabla 17 Resultado de geometría y densidad para la mezcla de 7000 psi.

ID	Días de curado	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Peso (g)	Densidad (g/cm ³)
RC-1	7	103.0	203.0	3909	2.31
RC-2	7	106.0	204.0	3904	2.17
RC-3	7	106.0	204.0	3941	2.19
RC-4	14	102.0	201.0	3910	2.38
RC-5	14	102.0	203.0	3924	2.37
RC-6	14	102.0	204.0	3935	2.36
RC-7	28	103.0	204.0	3924	2.31
RC-8	28	106.0	203.0	3924	2.19
RC-9	28	103.0	204.0	3958	2.33
RC-10	56	102.0	204.0	3923	2.35
RC-11	56	102.0	205.0	3940	2.40
RC-12	56	101.0	204.0	3911	2.39
RC-13	90	103.0	205.0	3937	2.30
RC-14	90	102.0	202.0	3906	2.37

7.1.11. Mezcla de 10000 psi.

Para la mezcla definitiva de 10000 psi, se calculó la densidad de cada una de las 14 muestras a las diferentes edades establecidas para el ensayo, el resultado promedio fue 2.24 g/cm³, estando esta densidad dentro del rango entre 2.20 y 2.40 g/cm³ (Neville, 1992). A continuación, se presentan los resultados de las mezclas definitivas de 10000 psi.

Tabla 18 Resultado de geometría y densidad para la mezcla de 10000 psi.

ID	Días de curado	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Peso (g)	Densidad (g/cm3)
RC-1	7	103.0	201.0	3765	2.25
RC-2	7	106.0	202.0	3833	2.15
RC-3	7	106.0	203.0	3834	2.14
RC-4	14	106.0	204.0	3872	2.15
RC-5	14	106.0	202.0	3850	2.16
RC-6	14	106.0	204.0	3915	2.17
RC-7	28	103.0	204.0	3854	2.27
RC-8	28	106.0	203.0	3834	2.14
RC-9	28	106.0	202.0	3759	2.11
RC-10	56	101.0	204.0	3838	2.35
RC-11	56	103.0	202.0	3806	2.26
RC-12	56	102.0	205.0	3908	2.33
RC-13	90	101.0	202.0	3849	2.38
RC-14	90	101.0	202.0	3847	2.38

7.2. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y ULTRASONIDO

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en las mezclas preliminares, se debió mejorar el método de mezclado empleado en la elaboración de las mezclas, además se empleó un cemento estructural con el fin de mejorar las propiedades mecánicas de los concretos en estudio, ya que algunas probetas no llegaban al 100% de la resistencia de diseño.. A continuación, se presentan los resultados para las mezclas definitivas por edad donde se identifica la evolución en el tiempo de la resistencia a la compresión de las mezclas de concreto. Además, se presentan los resultados del ensayo de ultrasonido, donde se reportan los valores de la velocidad de onda promedio para cada una de las mezclas y su evolución en el tiempo.

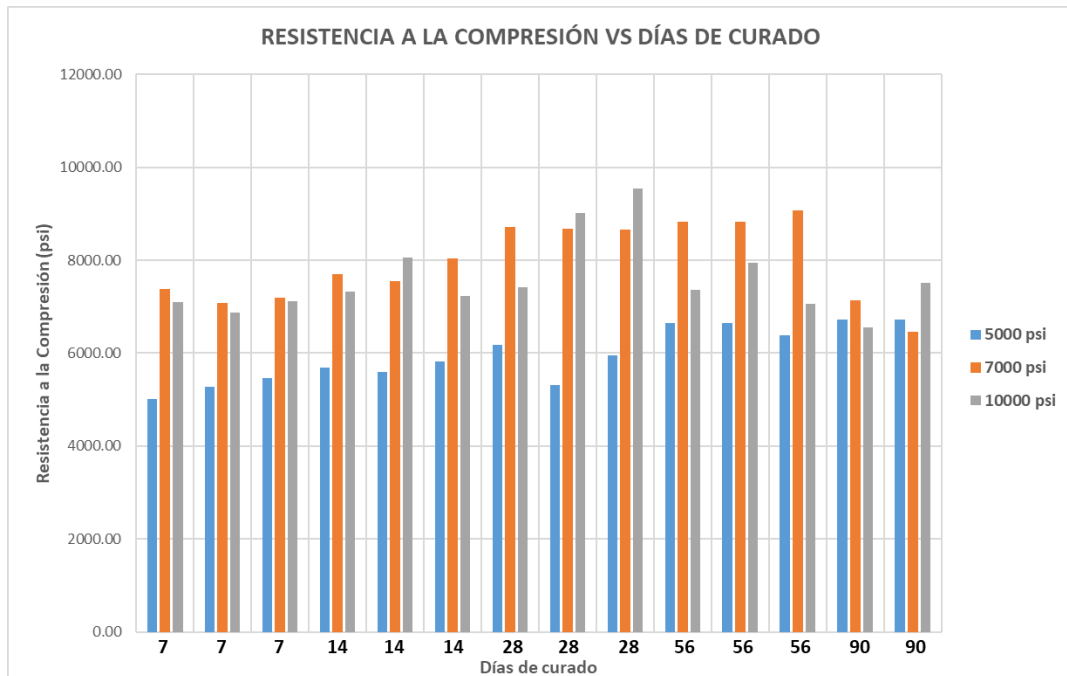


Figura 43 Resumen de la evolución de la resistencia a la compresión en función del tiempo de curado.

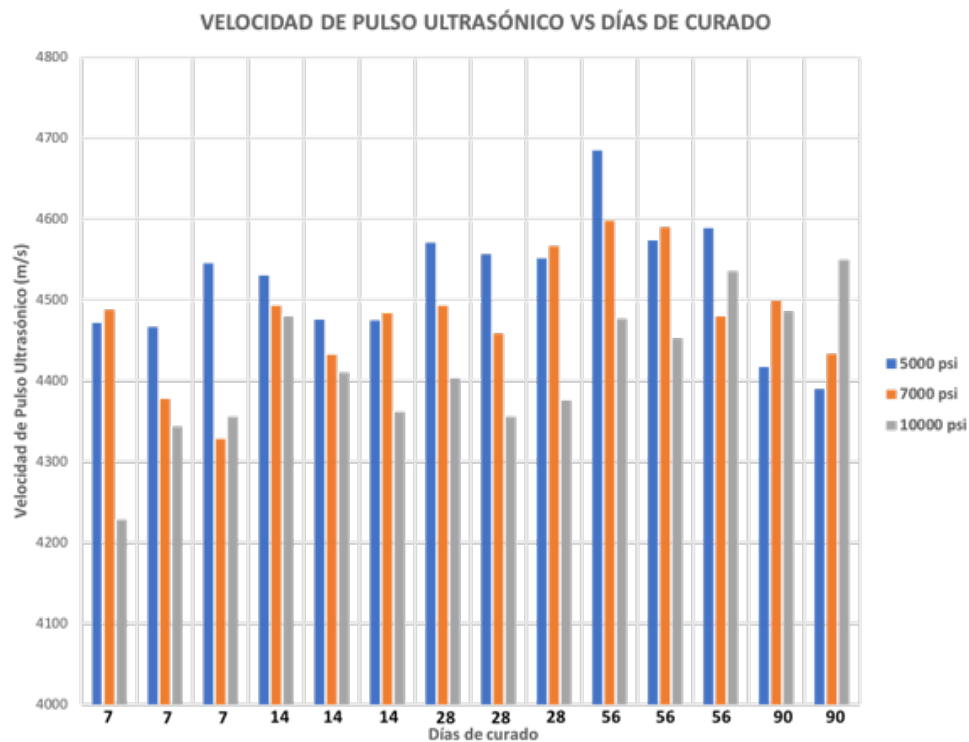


Figura 44 Resumen de la evolución de la velocidad de pulso ultrasónico en función del tiempo de curado.

7.2.1. Mezcla de 5000 psi.

De acuerdo con el resultado obtenido en las mezclas definitivas, y analizando la resistencia a la compresión objetivo (a los 28 días de curado) se obtuvieron los siguientes resultados: Para los 7 días se alcanzó un 105%, para los 14 días se logró un 114%, para los 28 días un 116%, para los 56 días un 131% y a los 90 días se logró un 135% de la resistencia de diseño, mostrando una evolución en el tiempo como se esperaba. Es importante notar que la resistencia de diseño fue superada en un 35%, aunque el valor fue superado, se continuó trabajando con estas mezclas. Con respecto a los resultados correspondientes a velocidad de pulso ultrasónico, se encontró una evolución en el tiempo, lo cual es importante para realizar una correlación entre la resistencia mecánica y la velocidad de pulso ultrasónico. A continuación, se presentan los resultados correspondientes a estos ensayos (tabla 19).

Tabla 19 Carga última, esfuerzo último y velocidad de onda promedio de la mezcla de 5000 psi.

ID	Días de curado	Carga Última (kN)	Esfuerzo Último (MPa)	Esfuerzo Último (psi)	Promedio Tiempo (μ s)	Velocidad de Onda (m/s)
RC-1	7	271,2	34,52	5005,4	45,2	4472
RC-2	7	285,7	36,37	5273,65	45,0	4467
RC-3	7	296,3	37,73	5470,85	44,4	4546
RC-4	14	308,4	39,27	5694,15	45,0	4530
RC-5	14	303,9	38,61	5598,45	45,8	4476
RC-6	14	315,7	40,11	5815,95	45,4	4475
RC-7	28	347,9	42,58	6174,1	44,6	4571
RC-8	28	293,4	36,62	5309,9	44,8	4557
RC-9	28	335,3	41,04	5950,8	44,6	4552
RC-10	56	367,7	45,89	6654,05	44,0	4685
RC-11	56	379,5	45,83	6645,35	44,6	4574
RC-12	56	353	44,05	6387,25	44,2	4589
RC-13	90	371,6	46,38	6725,1	45,7	4417
RC-14	90	386,4	46,38	6725,1	46,5	4390

7.2.2. Mezcla de 7000 psi.

De acuerdo con los resultados obtenidos en las mezclas definitivas, considerando la resistencia a la compresión objetivo, se alcanzaron los siguientes resultados: Para los 7 días se alcanzó un 103% de la resistencia, para los 14 días se obtuvo un 111%, para los 28 días un 124%, para los 56 días un 127%, mientras que para los 90 días se alcanzó solo un 97% de la resistencia de diseño. El valor correspondiente a 90 días, se hizo con el fin de verificar la resistencia en caso de no alcanzar el valor a los 28 y 56 días. Es importante notar que la resistencia de diseño fue superada en un 27%: aunque el valor fue superado, se continuó trabajando con estas mezclas. Teniendo en cuenta la relación ya encontrada para las mezclas de 5000 psi. A continuación, se presentan los resultados correspondientes a estos ensayos (tabla 20).

Tabla 20 Carga última, esfuerzo último y velocidad de onda promedio de la mezcla de 7000 psi.

ID	Días de curado	Carga Última (kN)	Esfuerzo Último (MPa)	Esfuerzo Último (psi)	Promedio Tiempo (microseg)	Velocidad de Onda (m/s)
RC-1	7	410,2	50,9	7380,5	45,2	4487,8
RC-2	7	395,6	48,79	7074,55	46,6	4377,7
RC-3	7	402,5	49,65	7199,25	47,1	4328,1
RC-4	14	433,5	53,05	7692,25	44,7	4493,3
RC-5	14	425,9	52,12	7557,4	45,8	4432,3
RC-6	14	452,7	55,4	8033	45,5	4483,5
RC-7	28	484	60,05	8707,25	45,4	4493,4
RC-8	28	484,7	59,79	8669,55	45,5	4458,3
RC-9	28	481,1	59,7	8656,5	44,7	4567,2
RC-10	56	497,4	60,87	8826,15	44,4	4598,0
RC-11	56	497,4	60,87	8826,15	44,7	4589,6
RC-12	56	500,7	62,5	9062,5	45,5	4480,2
RC-13	90	409,9	49,2	7134	45,6	4498,9

RC-14	90	363,2	44,45	6445,25	45,6	4433,1
-------	----	-------	-------	---------	------	--------

7.2.3. Mezcla de 10000 psi.

De acuerdo con los resultados obtenidos de la resistencia a la compresión y comparándolo con la resistencia de diseño a los 28 días se observan los siguientes resultados: Para los 7 días se alcanzó un 70%, para los 14 días se logró un 75%, para los 28 días un 87%, para los 56 días un 75% y a los 90 días se logró un 70% de la resistencia de diseño. Es importante notar que la resistencia de diseño no fue alcanzada, sin embargo, se usaron las probetas para el resto de ensayos, el resultado correspondiente a 90 días, se hizo con el fin de comprobar la resistencia en caso de no alcanzar el valor a los 56 días, sin embargo estas muestras tampoco alcanzaron la resistencia objetivo del diseño de mezcla. Con respecto a los resultados correspondientes a velocidad de pulso ultrasónico, se encontró en general una evolución en el tiempo. A continuación, se presentan los resultados correspondientes a estos ensayos (tabla 21).

Tabla 21 Carga última, esfuerzo último y velocidad de onda promedio de la mezcla de 10000 psi.

ID	Días de curado	Carga Última (kN)	Esfuerzo Último (MPa)	Esfuerzo Último (psi)	Promedio Tiempo (microseg)	Velocidad de Onda (m/s)
RC-1	7	384,6	48,97	7100,65	47,5	4228,6
RC-2	7	372,1	47,38	6870,1	46,5	4344,1
RC-3	7	385,9	49,13	7123,85	46,6	4356,2
RC-4	14	409,3	50,49	7321,05	45,5	4480,2
RC-5	14	450,3	55,54	8053,3	45,8	4410,5
RC-6	14	404,3	49,87	7231,15	46,8	4362,1
RC-7	28	412,4	51,17	7419,65	46,3	4402,9
RC-8	28	504,4	62,21	9020,45	46,6	4356,2
RC-9	28	533,9	65,85	9548,25	46,2	4375,5

RC-10	56	415	50,78	7363,1	45,6	4477,0
RC-11	56	438,4	54,72	7934,4	45,4	4452,6
RC-12	56	406	48,73	7065,85	45,2	4535,4
RC-13	90	361,9	45,17	6549,65	45,0	4485,6
RC-14	90	415,3	51,83	7515,35	44,4	4549,5

7.3. RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL CONCRETO

A continuación, se presentan los resultados de resistividad eléctrica del concreto para las mezclas definitivas. Este ensayo se realizó a diferentes edades de curado desde los 7 días hasta los 90 días. En las gráficas que se muestran a continuación incluyen la evolución en el tiempo de este parámetro para cada una de las mezclas del proyecto. La metodología descrita en la sección 5.5.2 fue aplicada para la ejecución de estos ensayos.

7.3.1. Mezcla de 5000 psi.

Los resultados de resistividad para esta mezcla fueron en promedio de 3,86 kΩ-cm para los 7 días, 4,61 kΩ-cm a los 14 días, 5,90 kΩ-cm a los 28 días, 7,42 kΩ-cm a los 56 días y 12,46 kΩ-cm a los 90 días. Los resultados obtenidos para esta mezcla son mayores que las mezclas preliminares ya que la resistencia mecánica fue mayor claramente muestran la tendencia a aumentar a medida que aumenta el tiempo de curado.

La evolución de la resistividad del hormigón en el tiempo, viene dada por las condiciones de curado. Dos elementos claves influyen en la variación de este parámetro, como el grado de hidratación de la pasta de cemento y el grado de saturación de la muestra (Azarsa y Gupta, 2017).

También reporta un autor que uno de los factores que ayudan a esta evolución es el cambio en el grado de saturación del concreto ya que variaría la cantidad de fluido en la red de poros. El autor recomienda utilizar un método de curado uniforme y garantizar que las muestras se encuentren en condiciones de superficie saturada seca para que la medición no se vea afectada por este factor (Layssi et al., 2015).

Tabla 22 Resultados de resistividad eléctrica de la mezcla de 5000 psi.

ID	Resistencia Rs #1 [Ω]	Resistencia Rs #2 [Ω]	Resistencia Promedio [Ω]	Resistencia esponja Superior e Inferior [Ω]		Resistencia Bulk [Ω]	Resistividad [k Ω -cm]
RC-1	1000,00	1000,00	1000,00	25,00	10,00	965,00	3,752
RC-2	1060,00	1060,00	1060,00	25,00	10,00	1025,00	4,005
RC-3	1020,00	1020,00	1020,00	25,00	10,00	985,00	3,830
RC-4	1300,00	1300,00	1300,00	50,00	35,00	1215,00	4,678
RC-5	1300,00	1300,00	1300,00	50,00	35,00	1215,00	4,748
RC-6	1200,00	1200,00	1200,00	50,00	35,00	1115,00	4,401
RC-7	1500,00	1500,00	1500,00	15,00	5,00	1480,00	5,928
RC-8	1500,00	1500,00	1500,00	15,00	5,00	1480,00	5,813
RC-9	1500,00	1500,00	1500,00	15,00	5,00	1480,00	5,957
RC-10	2000,00	2000,00	2000,00	49,00	37,00	1914,00	7,444
RC-11	1900,00	1900,00	1900,00	49,00	37,00	1814,00	7,266
RC-12	2000,00	2000,00	2000,00	49,00	37,00	1914,00	7,554
RC-13	3200,00	3200,00	3200,00	37,00	16,00	3147,00	12,482
RC-14	3100,00	3100,00	3100,00	37,00	16,00	3047,00	12,445

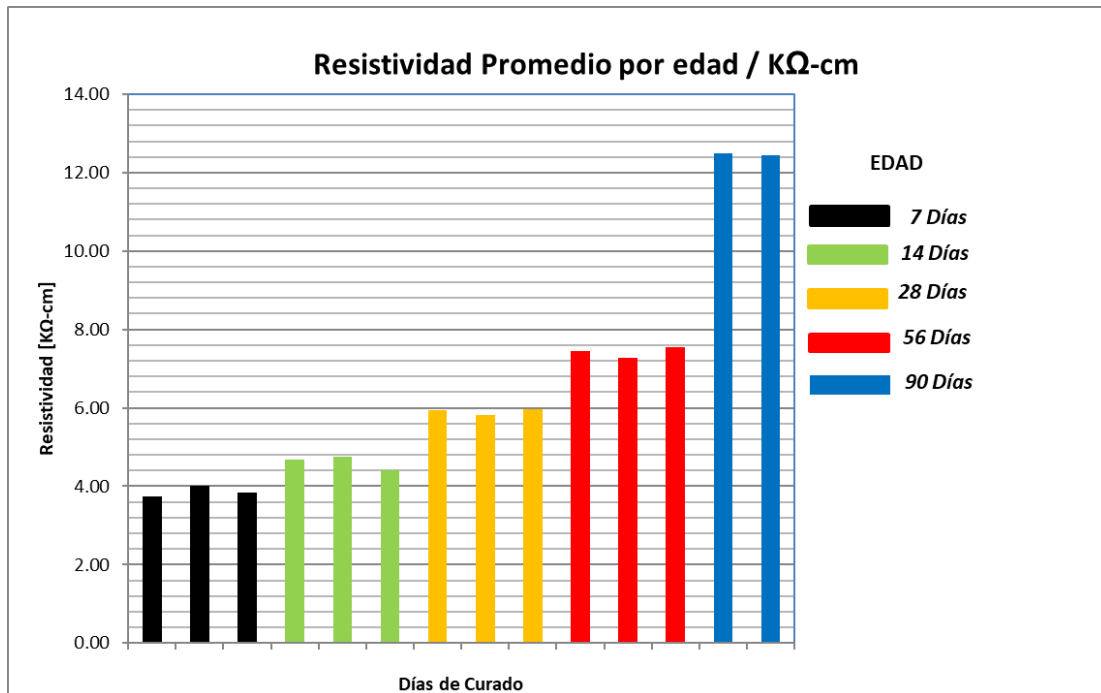


Figura 45 Resultado del ensayo de resistividad para la mezcla de 5000 psi.

7.3.2. Mezcla de 7000 psi.

Los resultados de resistividad para esta mezcla fueron en promedio de 5,96 kΩ-cm a los 7 días, 7,33 kΩ-cm a los 14 días, 13,11 kΩ-cm a los 28 días, 20,65 kΩ-cm a los 56 días y 27,30 kΩ-cm a los 90 días. Los resultados obtenidos para esta mezcla son mayores que las mezclas preliminares y se evidencia la evolución en el tiempo de este parámetro al igual que la resistencia a la compresión de las diferentes mezclas de concreto en estudio.

Tabla 23 Resultados de resistividad eléctrica de la mezcla de 7000 psi.

ID	Resistencia	Resistencia	Resistencia	Resistencia esponja		Resistencia	Resistividad
	Rs #1 [Ω]	Rs #2 [Ω]	Promedio [Ω]	Superior	Inferior [Ω]	Bulk [Ω]	[$k\Omega$ -cm]
RC-1	1300,00	1300,00	1300,00	25,00	10,00	1265,00	5,192
RC-2	1500,00	1500,00	1500,00	25,00	10,00	1465,00	6,337
RC-3	1500,00	1500,00	1500,00	25,00	10,00	1465,00	6,337
RC-4	2000,00	2000,00	2000,00	41,00	57,00	1902,00	7,732
RC-5	1900,00	1800,00	1850,00	41,00	57,00	1752,00	7,052
RC-6	1900,00	1900,00	1900,00	41,00	57,00	1802,00	7,218
RC-7	3200,00	3200,00	3200,00	78,00	29,00	3093,00	12,633
RC-8	3200,00	3200,00	3200,00	78,00	29,00	3093,00	13,446
RC-9	3400,00	3300,00	3350,00	78,00	29,00	3243,00	13,246
RC-10	5200,00	5200,00	5200,00	36,00	0,90	5163,10	20,681
RC-11	5400,00	5400,00	5400,00	36,00	0,90	5363,10	21,377
RC-12	5100,00	5100,00	5100,00	36,00	0,90	5063,10	19,885
RC-13	6900,00	6900,00	6900,00	37,00	16,00	6847,00	27,966
RC-14	6700,00	6700,00	6700,00	37,00	16,00	6647,00	26,625

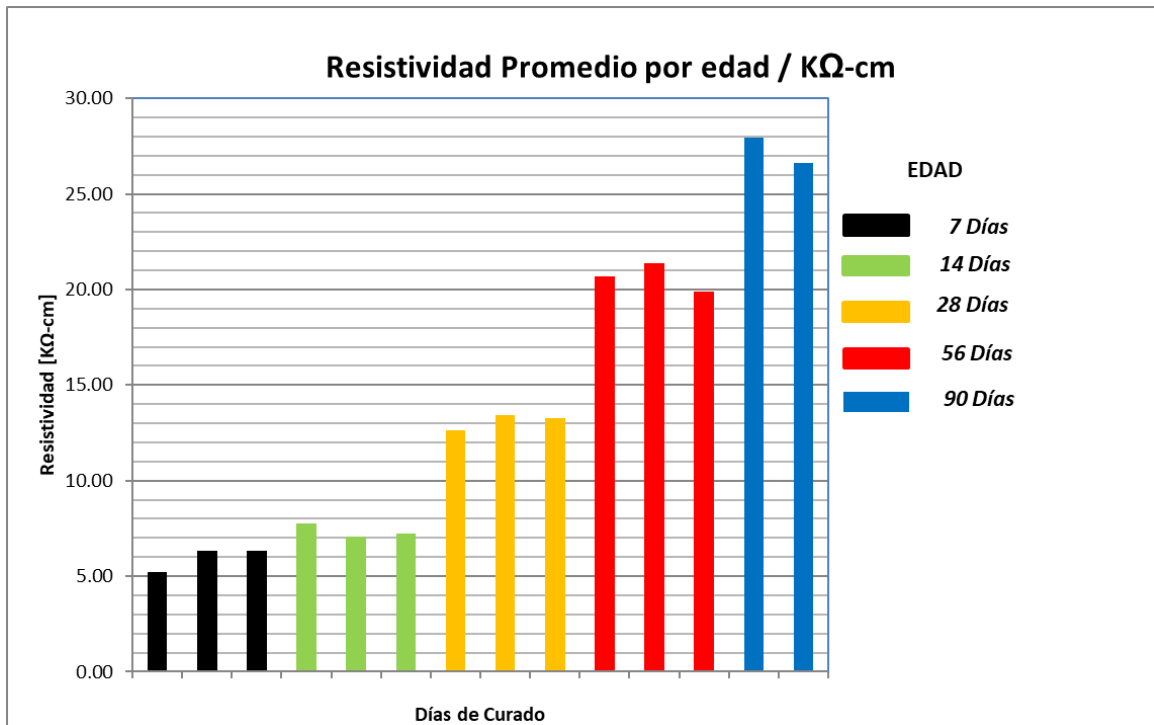


Figura 46 Resultado del ensayo de resistividad para la mezcla de 7000 psi.

7.3.3. Mezcla de 10000 psi

Los resultados de resistividad para esta mezcla fueron en promedio de 5,86 kΩ-cm a los 7 días, 9,48 kΩ-cm a los 14 días, 10,83 kΩ-cm a los 28 días, 18,08 kΩ-cm a los 56 días y 34,33 kΩ-cm a los 90 días.

Tabla 24 Resultados de resistividad eléctrica de la mezcla de 10000 psi.

ID	Resistencia Rs #1 [Ω]	Resistencia Rs #2 [Ω]	Resistencia Promedio [Ω]	Resistencia esponja Superior e Inferior [Ω]		Resistencia Bulk [Ω]	Resistividad[k Ω -cm]
RC-1	1400,00	1400,00	1400,00	75,00	110,00	1215,00	5,037
RC-2	1700,00	1600,00	1650,00	75,00	110,00	1465,00	6,400
RC-3	1600,00	1600,00	1600,00	75,00	110,00	1415,00	6,151
RC-4	2300,00	2300,00	2300,00	41,00	57,00	2202,00	9,526
RC-5	2200,00	2100,00	2150,00	41,00	57,00	2052,00	8,965
RC-6	2400,00	2400,00	2400,00	41,00	57,00	2302,00	9,958
RC-7	2900,00	2900,00	2900,00	78,00	29,00	2793,00	11,408
RC-8	2700,00	2800,00	2750,00	78,00	29,00	2643,00	11,490
RC-9	2300,00	2300,00	2300,00	78,00	29,00	2193,00	9,581
RC-10	4400,00	4400,00	4400,00	40,00	52,00	4308,00	16,919
RC-11	4400,00	4400,00	4400,00	40,00	52,00	4308,00	17,770
RC-12	5000,00	5000,00	5000,00	40,00	52,00	4908,00	19,563
RC-13	6900,00	8600,00	8600,00	37,00	16,00	8547,00	33,733
RC-14	6700,00	8900,00	8900,00	37,00	16,00	8847,00	34,917



Figura 47 Resultado del ensayo de resistividad para la mezcla de 10000 psi.

7.4. DIFUSIÓN DE ION CLORURO

De acuerdo con el procedimiento descrito en la sección 5.5.4, se muestran a continuación los resultados correspondientes al ensayo acelerado de difusión de ion cloruro. Se evaluaron dos edades, la primera edad (35 días) corresponde al período mínimo de exposición que exige la norma (*NT Build 443*). A continuación, se presentan los resultados obtenidos empleando la metodología del análisis de cloruros, en la cual se registran los voltajes que se van obteniendo de cada punto del perfil (Tablas 25 y 26), además se presentan los resultados del contenido de cloruros en porcentaje por peso de cemento.

Tabla 25 Registro de datos de voltaje obtenidos del software para la edad de 35 días

35 Días						
Profundidad (cm)	Voltaje (V)					
	5000_1	5000_2	7000_1	7000_2	10000_1	10000_2
0,75	0,1944	0,1837	0,3532	0,3847	0,3415	0,3654
2,25	0,2834	0,3011	0,447	0,4319	0,4159	0,4289
3,75	0,3772	0,3924	0,4514	0,4495	0,429	0,4393
5,25	0,4354	0,437	0,4541	0,4601	0,4397	0,4412
6,75	0,4596	0,4672	0,4562	0,4616	0,4544	0,4501
8,75	0,4802	0,4753	0,4577	0,4867	0,4572	0,4514

Tabla 26 Registro de datos de voltaje obtenidos del software para la edad de 120 días

120 Días						
Profundidad (cm)	Voltaje (V)					
	5000_1	5000_2	7000_1	7000_2	10000_1	10000_2
0,75	0,1432	0,1334	0,1844	0,1903	0,1989	0,1942
2,25	0,1796	0,1803	0,2432	0,2566	0,2407	0,2486
3,75	0,2382	0,4116	0,2604	0,2654	0,2588	0,2703
5,25	0,2811	0,4612	0,3812	0,3102	0,3242	0,3055
6,75	0,4721	0,4754	0,4801	0,4814	0,4754	0,4834
8,75	0,4988	0,4902	0,4989	0,4973	0,4912	0,4879

Tabla 27 Contenido de cloruros por peso de cemento – Período de exposición 35 días.

35 Días						
Profundidad (cm)	% por Peso de cemento					
	5000_1	5000_2	7000_1	7000_2	10000_1	10000_2
0,75	8,62%	7,75%	2,05%	1,44%	2,22%	1,77%
2,25	4,31%	3,88%	0,30%	0,52%	0,81%	0,57%
3,75	2,01%	1,63%	0,24%	0,26%	0,57%	0,37%
5,25	0,58%	0,55%	0,20%	0,12%	0,36%	0,33%
6,75	0,07%	0,06%	0,17%	0,10%	0,19%	0,17%
8,75	0,03%	0,04%	0,15%	0,01%	0,16%	0,14%

Para este tiempo de exposición, se obtuvieron valores de mayor concentración de cloruros de 8,2% por peso de cemento para el concreto de 5000 psi, 1,75% para el concreto de 7000 psi y 2% para el concreto de 10000 psi. Los valores de los concretos de 7000 y 10000 psi son

muy cercanos. A continuación, se muestran los perfiles correspondientes a al período de 35 días de exposición.

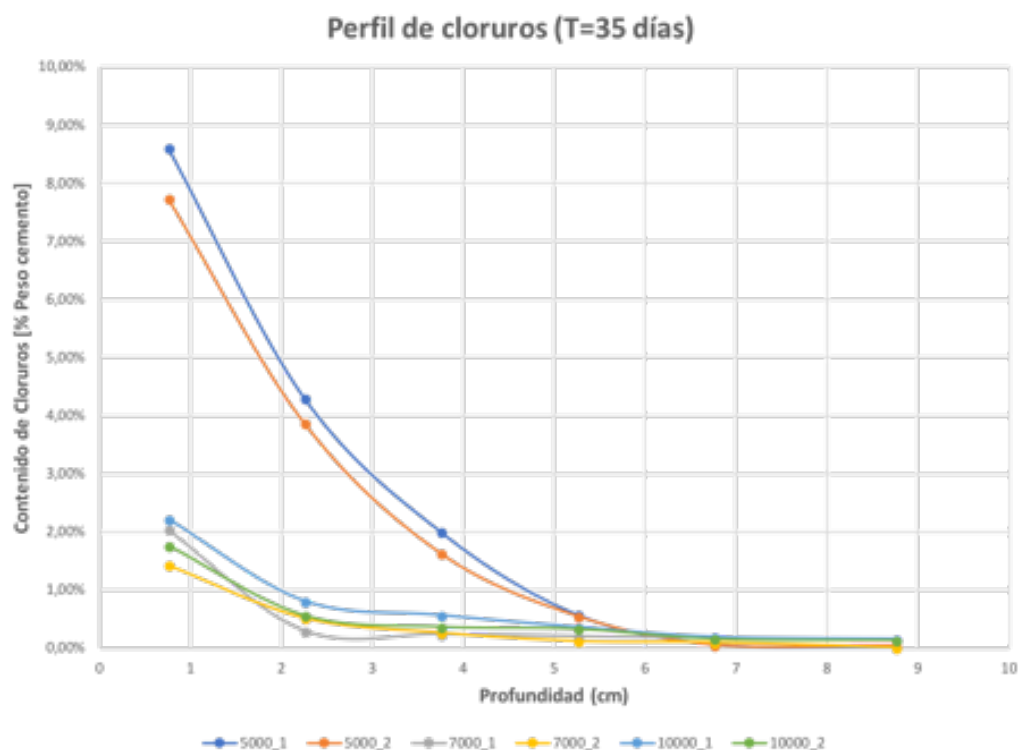


Figura 48 Perfiles de cloruros para un período de exposición de 35 días.

En la tabla que se registra a continuación (Tabla 28), se presentan los resultados referentes al contenido de cloruros por peso de cemento de distintas mezclas para un período de exposición de 120 días.

Tabla 28 Contenido de cloruros por peso de cemento – Período de exposición 120 días.

Profundidad (cm)	120 Días					
	% por Peso de cemento					
	5000_3	5000_4	7000_3	7000_4	10000_3	10000_4
0,75	12,49%	11,83%	4,46%	4,18%	3,68%	3,91%
2,25	6,24%	5,91%	1,63%	0,98%	1,71%	1,34%
3,75	2,37%	0,22%	0,80%	0,56%	0,86%	0,45%
5,25	0,56%	0,09%	0,23%	0,38%	0,34%	0,38%
6,75	0,06%	0,05%	0,03%	0,03%	0,04%	0,03%
8,75	0,00%	0,02%	0,00%	0,01%	0,02%	0,02%

Para el período de exposición de 120 días, se obtuvieron valores de mayor concentración de cloruros de 12,16% por peso de cemento para el concreto de 5000 psi, 4,32% para el concreto de 7000 psi y 3,8% para el concreto de 10000 psi. A continuación, se muestran los perfiles correspondientes a al período de 120 días de exposición. Debido al constante ingreso de cloruros en el concreto, el perfil va cambiando cuando aumenta el período de exposición. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos se observa que las concentraciones van cambiando en el tiempo.

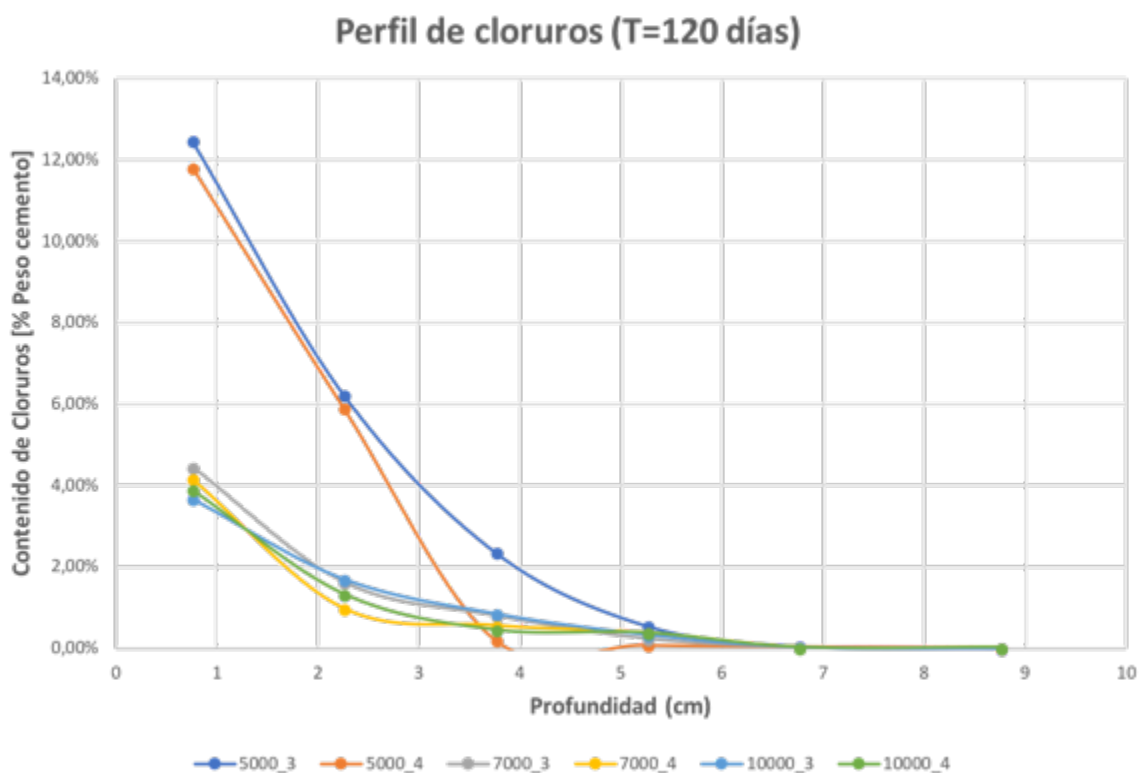


Figura 49 Perfiles de cloruros para un período de exposición de 120 días.

7.5. ENSAYO ACCELERADO DE CORROSIÓN.

A continuación, se presentan los resultados de este ensayo, donde se muestra cómo varía el voltaje en función del tiempo. El tiempo que tarda un espécimen en agrietarse para luego experimentar corrosión se puede identificar una vez exista un aumento significativo del voltaje como se muestra en la figura 50. Además, con el valor de la resistencia (100 ohmios)

se puede calcular la corriente a través de la ley de Ohm. Una vez registrado este resultado, se puede dividir entre el área expuesta de la barra con el fin de obtener la densidad de corriente (figura 51), para emplear este parámetro como medida de comparación con otras investigaciones.

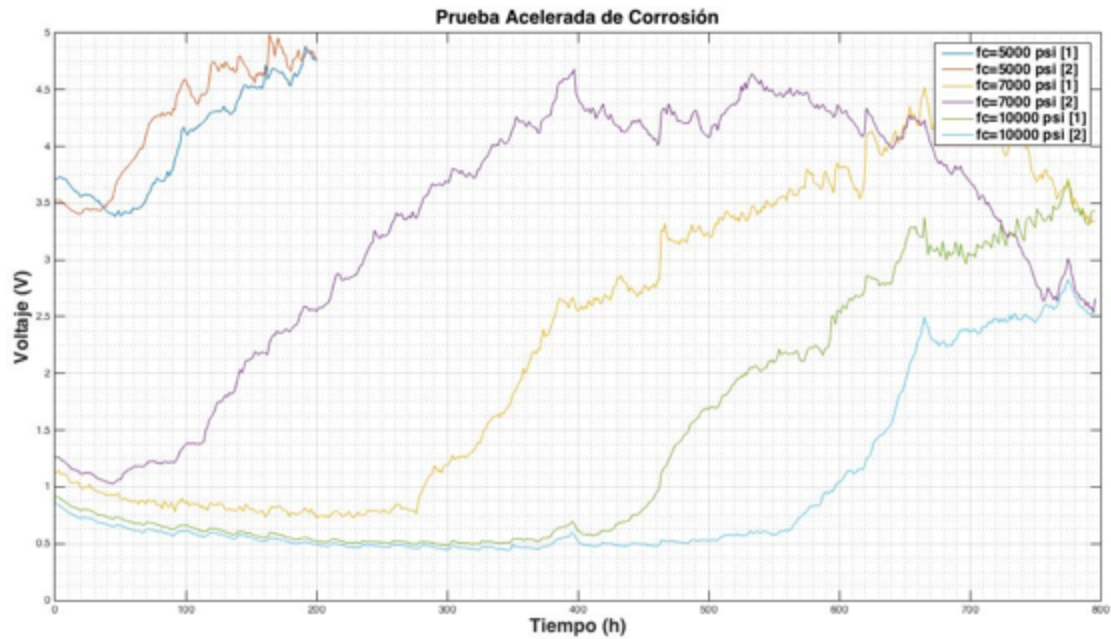


Figura 50 Gráfica de voltaje en función del tiempo.

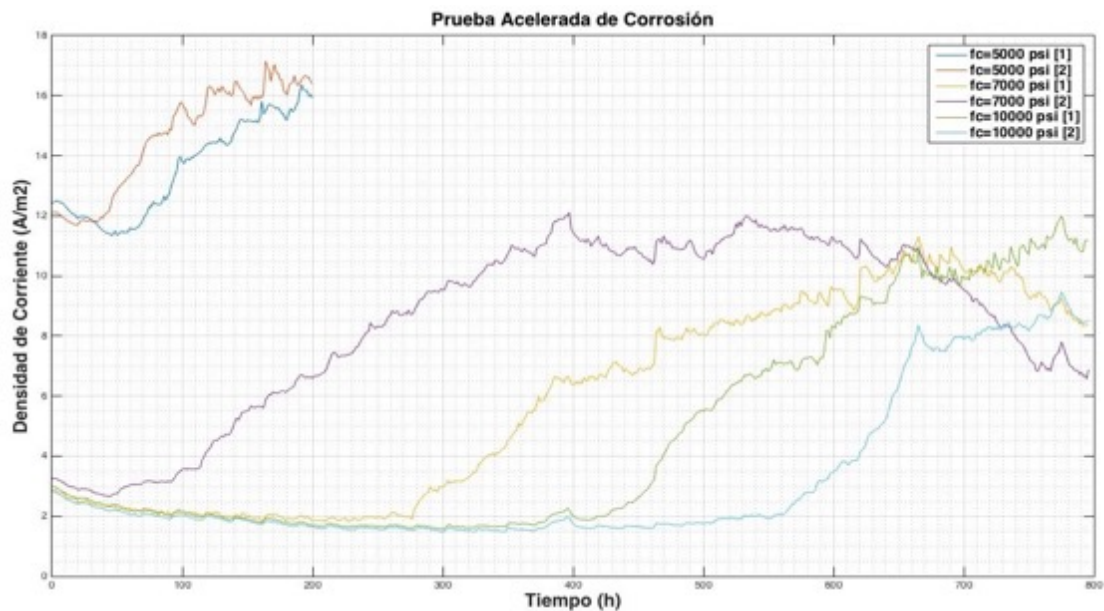


Figura 51 Gráfica de densidad de corriente en función del tiempo.

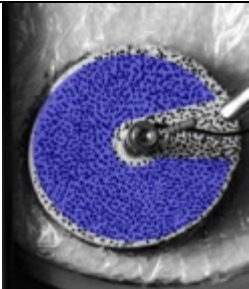
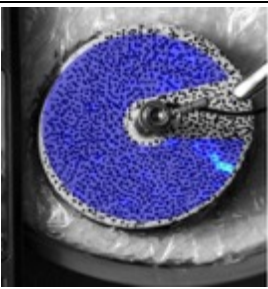
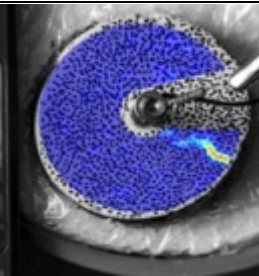
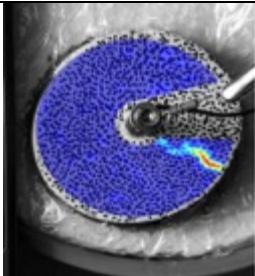
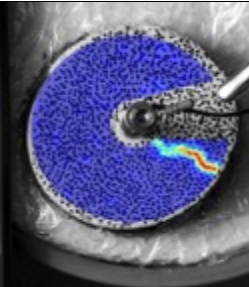
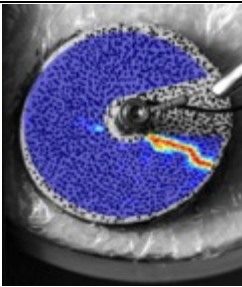
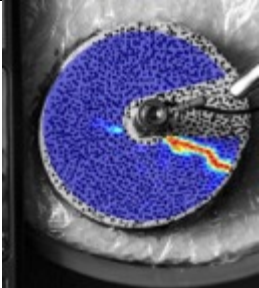
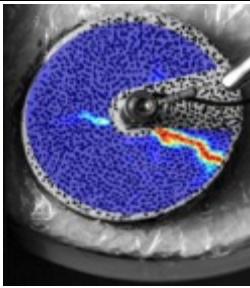
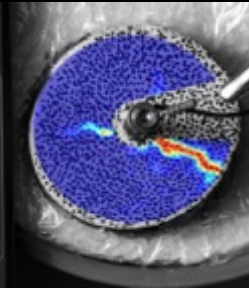
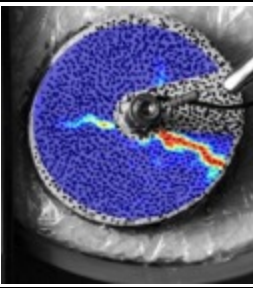
La evolución de la grieta de uno de los especímenes fue monitoreada a través de un registro fotográfico en el cual se identifican los instantes en que la grieta se va propagando a través del cilindro, desde adentro hacia afuera de manera radial en dirección hacia la superficie del concreto. Se realizó un seguimiento fotográfico de la grieta con el fin de establecer el tiempo que toma la muestra para presentar agrietamiento visible. A continuación, se presenta un registro fotográfico de la secuencia en el tiempo de la grieta en el concreto (Tabla 29).

Para realizar un seguimiento estricto de la propagación de la grieta en el espécimen, se realizó la preparación de una superficie plana del cilindro; evidentemente se tomó el lado superior del cilindro. Para adecuar esta superficie se empleó pintura de color blanco para que posteriormente se dibujaran con marcador unos puntos de referencia que posteriormente serán identificados por un software llamado OPTECAL. Este es un software de correlación de imágenes digitales que sirve para medir deformaciones y mapas de desplazamiento. A continuación, se presentan las imágenes del montaje de la cámara empleada para el registro de las fotografías de una de las muestras del ensayo acelerado de corrosión.



Figura 52 Montaje del seguimiento fotográfico a una de las muestras.

Tabla 29 Evolución en el tiempo de la grieta en el ensayo acelerado de corrosión.

65 horas	69 horas
	
70 horas	71 horas
	
73 horas	78 horas
	
79 horas	81 horas
	
83 horas	85 horas
	

7.6. PÉRDIDA DE MASA

A partir de la autopsia de las probetas que fueron sometidas al ensayo de corrosión acelerada presentada en la sección 5.5.5, se obtuvieron las barras de acero corroídas y se sometieron a limpieza para determinar la pérdida de masa por corrosión y de esta manera estimar la rata de corrosión. Para la realización de este ensayo se siguió el procedimiento del estándar *ASTM G1*, donde describe como debe realizarse el proceso de limpieza de los productos de corrosión de las barras. También se calculó un parámetro que describe la pérdida de masa del acero de refuerzo. Además, se realizó un proceso de medición de la sección transversal de la barra con el fin de establecer el área residual de la barra. A continuación, se presentan los parámetros del ensayo de pérdida de masa de las barras y la rata de corrosión, calculada con base en las condiciones del ensayo acelerado de corrosión.

Tabla 30 Resultados de pérdida de masa y rata de corrosión

ID	Pérdida de masa por corrosión [η]	Rata de corrosión ($\mu\text{m}/\text{y}$)
5000_1	61,74%	499,25
5000_2	64,94%	612,72
7000_3	27,05%	289,51
7000_4	13,71%	100,60
10000_3	0,63%	81,57
10000_4	0,47%	111,98

Para las gráficas que se muestra a continuación se calcula un parámetro llamado: Pérdida de masa (η), este valor corresponde al porcentaje de masa perdida de la muestra después de haber estado expuesta a un proceso de corrosión acelerado. La pérdida de masa inducida por la corrosión de barras de acero viene dada por la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{m_o - m}{m_o} \times 100\% \quad (11)$$

Donde:

m_o = Masa inicial de la muestra antes de la corrosión

m = Masa final después del lavado

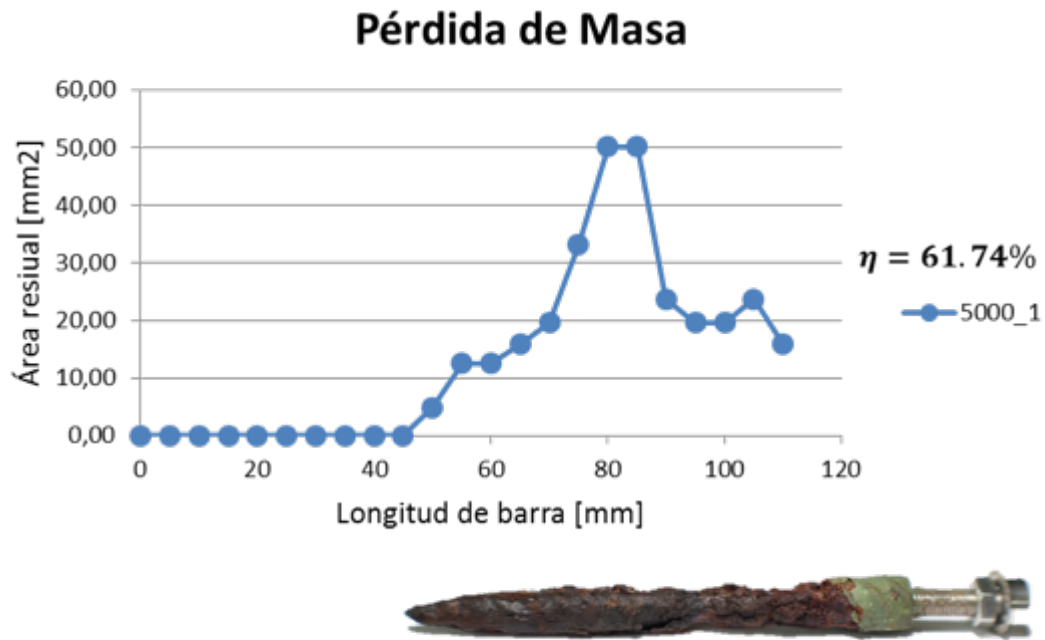


Figura 53 Pérdida de área residual del acero de refuerzo de la probeta 5000-1

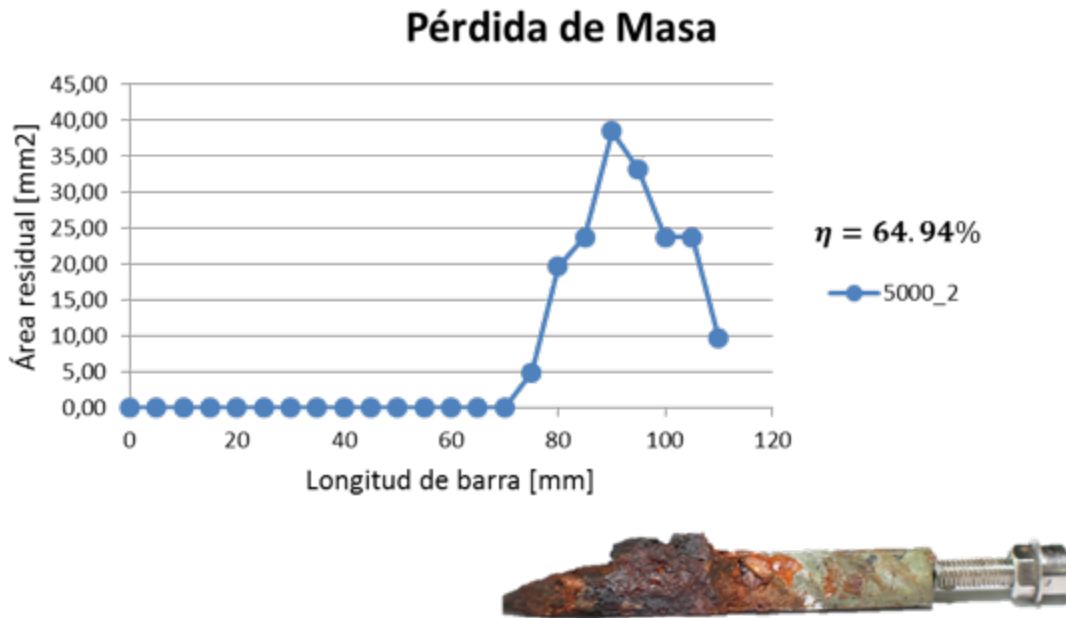


Figura 54 Pérdida de área residual del acero de refuerzo de la probeta 5000-2

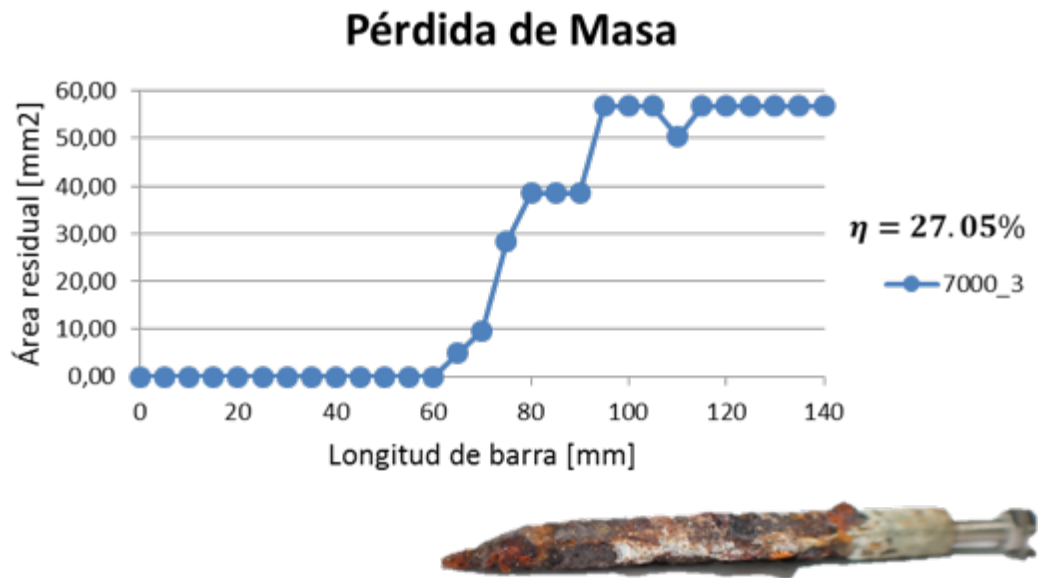


Figura 55 Pérdida de área residual del acero de refuerzo de la probeta 7000-3

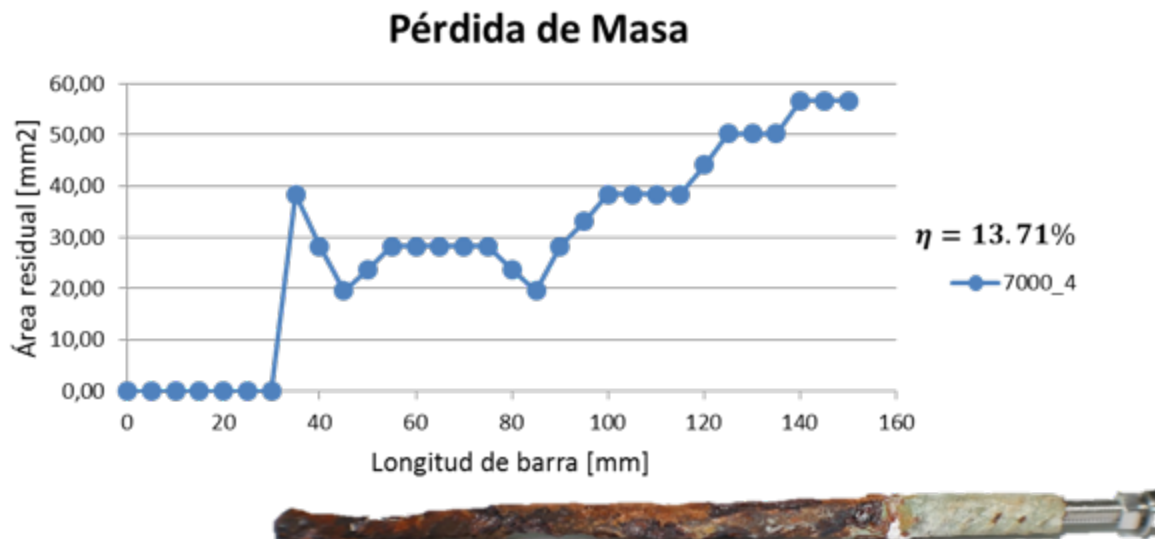


Figura 56 Pérdida de área residual del acero de refuerzo de la probeta 7000-4

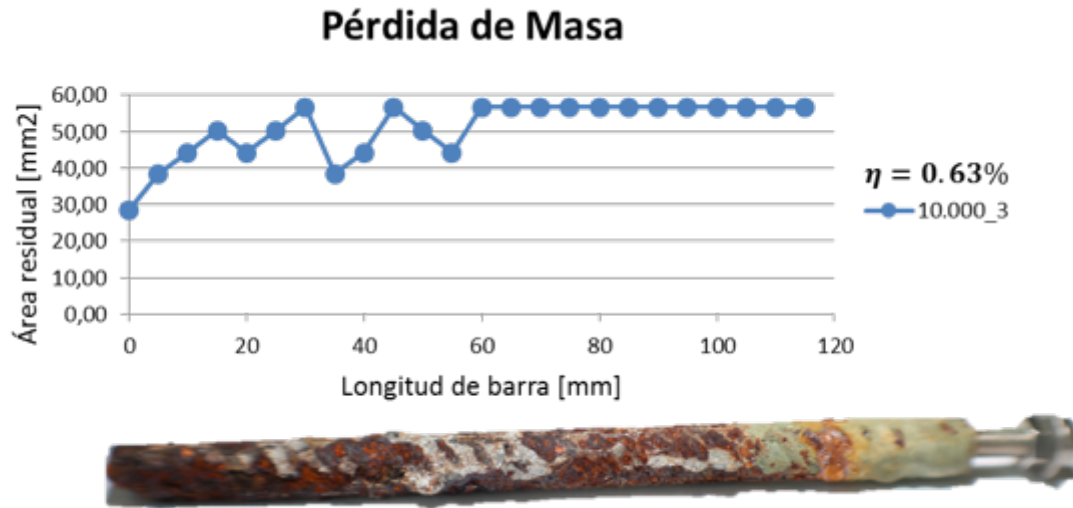


Figura 57 Pérdida de área residual del acero de refuerzo de la probeta 10000-3

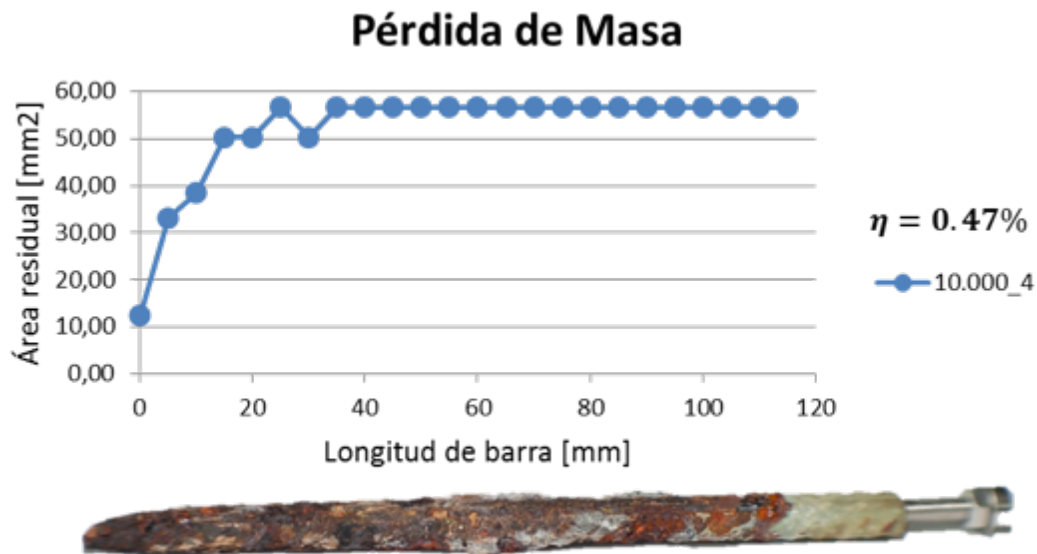


Figura 58 Pérdida de área residual del acero de refuerzo de la probeta 10000-4

7.7. SUCCIÓN CAPILAR.

Los resultados que se presentan a continuación corresponden a 4 réplicas preparadas de cada una de las mezclas empleadas en el estudio. De acuerdo con la normativa, se registraban los tiempos de cada medición y la masa correspondiente a cada período de tiempo. Los resultados indican se representan gráficamente identificando dos pendientes:

la pendiente de la línea recta correspondiente al ajuste de los datos referentes al período de tiempo medido de 0 a 6 horas llamado absorción inicial y al período medido de 1 a 8 días que corresponde a la absorción secundaria.

7.7.1. Mezcla 5000 psi.

Para la mezcla de 5000 psi se registraron valores de absorción muy similares para las 4 muestras. De acuerdo con estos valores se observa un comportamiento con poca variación, registrando valores muy cercanos en cada período de tiempo. La figura 59 muestra el comportamiento de la absorción en función de tiempo y se muestra una tendencia similar en las muestras ensayadas. A continuación, se presenta un resumen de los resultados obtenidos en el ensayo (Tabla 31).

Tabla 31 Registro de valores de absorción para las distintas muestras correspondientes a la mezcla de 5000 psi.

Mezcla 5000 psi						
Tiempo del ensayo		s ^{0.5}	Absorción [mm]			
Días	seg		5000 - 1	5000 - 2	5000 - 3	5000 - 4
	0	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	60	8	0.0918	0.0795	0.1126	0.1111
	300	17	0.1150	0.1212	0.1150	0.1373
	600	24	0.1212	0.1248	0.1273	0.1510
	1200	35	0.1322	0.1285	0.1395	0.1523
	1800	42	0.1432	0.1493	0.1701	0.1623
	3600	60	0.1787	0.2056	0.2056	0.1947
	7200	85	0.2252	0.2656	0.2325	0.1997
	10800	104	0.2313	0.2741	0.2350	0.2222
	14400	120	0.2337	0.2778	0.2337	0.2371
	18000	134	0.2374	0.2778	0.2374	0.2496
	21600	147	0.2472	0.2864	0.2301	0.2546
1	86400	294	0.2509	0.2900	0.2399	0.2559
2	154800	393	0.2570	0.2998	0.2411	0.2559

3	241200	491	0.2729	0.3047	0.2582	0.2708
5	417600	646	0.3121	0.3231	0.3170	0.3158
6	556800	746	0.3121	0.3353	0.3329	0.3195
7	639600	800	0.3170	0.3390	0.3341	0.3195
8	726000	852	0.3219	0.3402	0.3353	0.3607

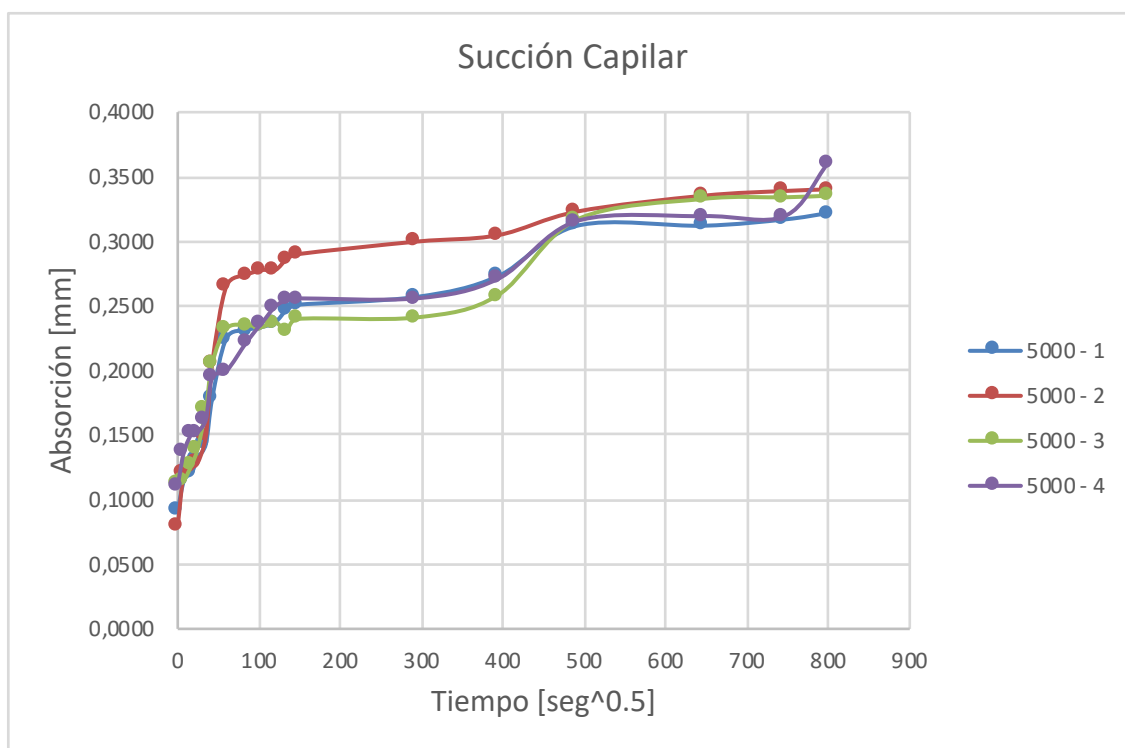


Figura 59 Gráfica de la absorción en función del tiempo para la mezcla de 5000 psi.

En la tabla 32 se muestran los resultados de absorción inicial y absorción secundaria. Se sabe que la pendiente que ajusta linealmente los datos correspondientes a la absorción de 0 a 6 horas y la absorción de 1 a 8 días corresponde a la absorción inicial y secundaria respectivamente. En promedio el valor de la absorción inicial es de $0.0011 \text{ mm/s}^{0.5}$ y el promedio de datos correspondiente a la absorción secundaria es de $0.00015 \text{ mm/s}^{0.5}$.

Tabla 32 Absorción inicial y secundaria de la mezcla de 5000 psi.

ID	Absorción [mm/s ^{0.5}]	
	Inicial	Secundaria
5000 - 1	0.001	0.0001
5000 - 2	0.0015	0.0001
5000 - 3	0.001	0.0002
5000 - 4	0.001	0.0002

7.7.2. Mezcla 7000 psi

Para la mezcla de 7000 psi se registraron valores de absorción muy similares para las 4 muestras. De acuerdo con estos valores se observa un comportamiento con poca variación, registrando valores cercanos en cada período de tiempo. La figura 60 muestra la evolución de la absorción de esta mezcla y se observa una tendencia similar en las cuatro muestras ensayadas. A continuación, se presenta un resumen de los resultados obtenidos en el ensayo (Tabla 33).

Tabla 33 Registro de valores de absorción para las distintas muestras correspondientes a la mezcla de 7000 psi.

Mezcla 7000 psi						
Tiempo del ensayo		s ^{0.5}	Absorción [mm]			
Días	seg		7000 - 1	7000 - 2	7000 - 3	7000 - 4
	0	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	60	8	0.1398	0.0942	0.0866	0.1603
	300	17	0.1323	0.0955	0.0955	0.1615
	600	24	0.1236	0.0979	0.1197	0.1652
	1200	35	0.1161	0.1101	0.1210	0.1726
	1800	42	0.1336	0.1383	0.1235	0.1934
	3600	60	0.1772	0.1407	0.1617	0.2227
	7200	85	0.1985	0.1432	0.1668	0.2509

	10800	104	0.2010	0.1444	0.1693	0.2521
	14400	120	0.2047	0.1469	0.1732	0.2533
	18000	134	0.2084	0.1481	0.1732	0.2546
	21600	147	0.2084	0.1505	0.1770	0.2607
1	86400	294	0.2109	0.1518	0.1795	0.2839
2	154800	393	0.2147	0.1566	0.1821	0.2790
3	241200	491	0.2159	0.1775	0.1795	0.2790
5	417600	646	0.2172	0.1921	0.1795	0.3011
6	556800	746	0.2322	0.1897	0.1833	0.2900
7	639600	800	0.2359	0.1836	0.1795	0.2925
8	726000	852	0.2359	0.1970	0.1961	0.3219

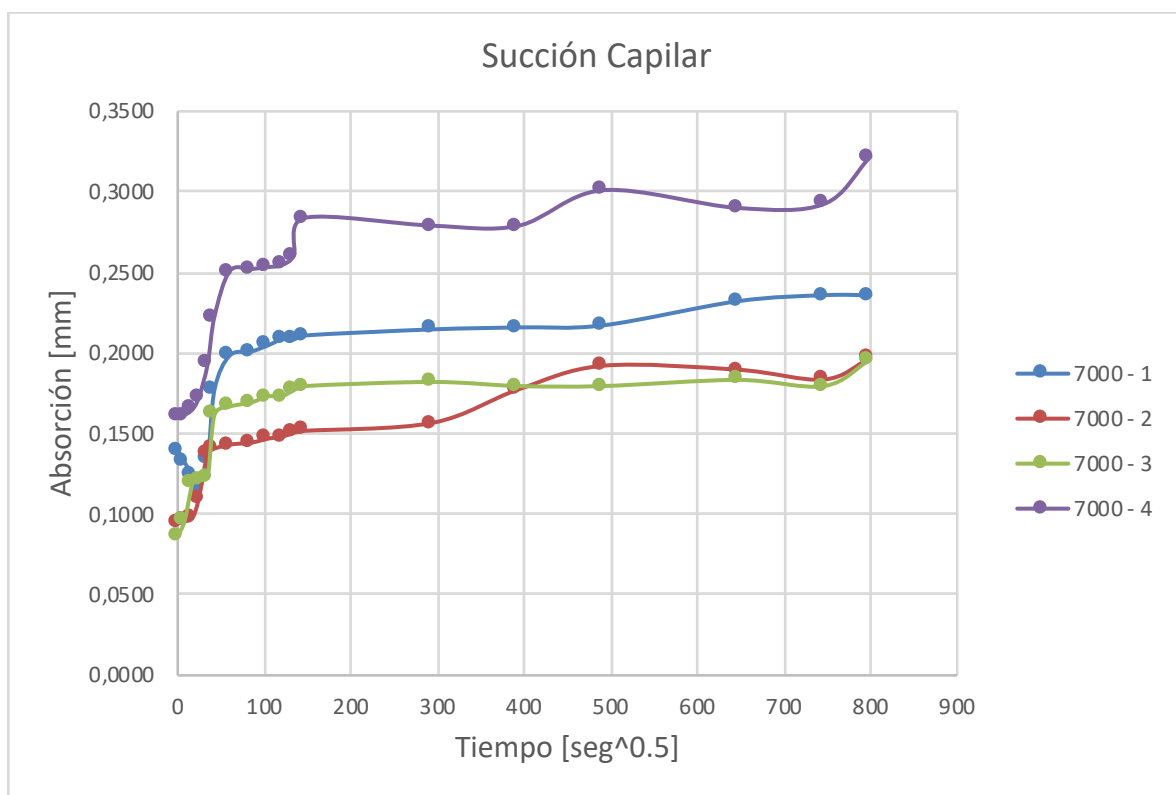


Figura 60 Gráfica de la absorción en función del tiempo para la mezcla de 7000 psi.

En la tabla 34 se muestran los resultados de absorción inicial y absorción secundaria. En promedio el valor de la absorción inicial es de 0.0063 mm/s^{0.5} y el promedio de datos

correspondiente a la absorción secundaria es de $0.00005 \text{ mm/s}^{0.5}$. Al aumentar la resistencia a la compresión de la mezcla, mejora el parámetro de absorción del concreto.

Tabla 34 Absorción inicial y secundaria de la mezcla de 7000 psi.

ID	Absorción [$\text{mm/s}^{0.5}$]	
	Inicial	Secundaria
7000 - 1	0.0007	0.00005
7000 - 2	0.0004	0.00008
7000 - 3	0.0006	0.00002
7000 - 4	0.0008	0.00005

7.7.3. Mezcla 10000 psi.

Para la mezcla de 10000 psi se registraron valores de absorción bastante bajo respecto a las mezclas anteriores. La figura 61 muestra el comportamiento de la absorción en función de tiempo de esta mezcla y se muestra una tendencia similar en las muestras ensayadas. A continuación, se presenta un resumen de los resultados obtenidos en el ensayo (Tabla 35).

Tabla 35 Registro de valores de absorción para las distintas muestras correspondientes a la mezcla de 10000 psi.

Mezcla 10000 psi						
Tiempo del ensayo		s ^{0.5}	Absorción [mm]			
Días	seg		10000 - 1	10000 - 2	10000 - 3	10000 - 4
	0	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	60	8	0.0832	0.1823	0.1673	0.0906
	300	17	0.1420	0.1836	0.1685	0.1016
	600	24	0.1432	0.1860	0.1710	0.1628
	1200	35	0.1456	0.1860	0.1722	0.1775
	1800	42	0.1469	0.1909	0.1735	0.1787
	3600	60	0.1848	0.1958	0.1772	0.2056
	7200	85	0.1823	0.1995	0.1797	0.2289
	10800	104	0.1897	0.2032	0.1810	0.2289
	14400	120	0.2093	0.2044	0.1872	0.2460
	18000	134	0.2093	0.2068	0.1885	0.2656
	21600	147	0.2105	0.2129	0.1897	0.2668
1	86400	294	0.2117	0.2289	0.1847	0.2705
2	154800	393	0.2129	0.2313	0.1897	0.2754
3	241200	491	0.2362	0.2325	0.1947	0.2705
5	417600	646	0.2362	0.2350	0.1947	0.2839
6	556800	746	0.2362	0.2362	0.1960	0.2802
7	639600	800	0.2656	0.2399	0.1997	0.2851
8	726000	852	0.2717	0.2558	0.2209	0.2876

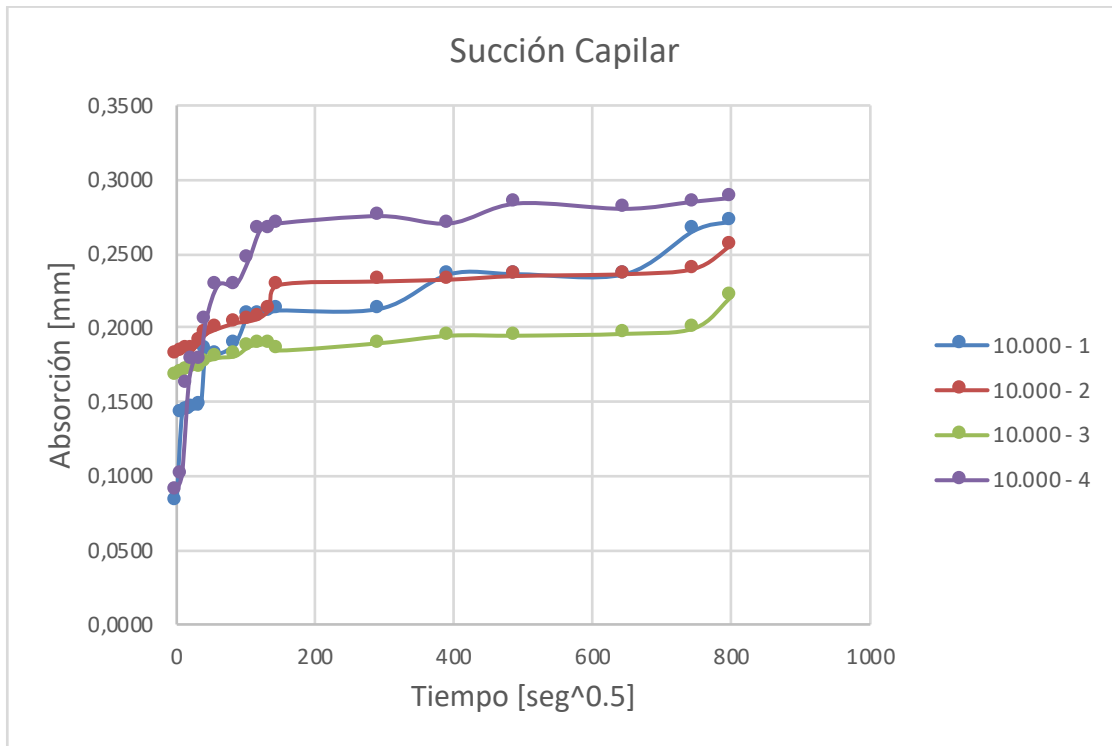


Figura 61 Gráfica de la absorción en función del tiempo para la mezcla de 10000 psi.

En la tabla 36 se muestran los resultados de absorción inicial y absorción secundaria. En promedio el valor de la absorción inicial es de 0.00055 mm/s^{0.5} y el promedio de datos correspondiente a la absorción secundaria es de 0.00005 mm/s^{0.5}. Al aumentar la resistencia a la compresión de la mezcla, se consigue mejorar las propiedades de absorción de la mezcla.

Tabla 36 Absorción inicial y secundaria de la mezcla de 10000 psi.

ID	Absorción [mm/s ^{0.5}]	
	Inicial	Secundaria
10000 - 1	0.0007	0.0001
10000 - 2	0.0002	0.00003
10000 - 3	0.0002	0.00004
10000 - 4	0.0011	0.00003

7.8. DETERMINACIÓN DE LA CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO EN DIFERENTES MEZCLAS DE CONCRETOS EXPUESTOS A AMBIENTES DE CLORUROS.

7.8.1. Carga Acumulada Macrocelda de Corrosión

Este ensayo tiene como finalidad determinar el efecto de una solución de cloruro de sodio sobre la mezcla en concreto y su efecto sobre el acero de refuerzo (ánodo). Para la recolección de datos, se registran los valores de voltaje y dividiendo este entre la resistencia del circuito, se obtiene la corriente en ese instante de tiempo. Es importante registrar estos datos ya que la carga registrada se debe ir acumulando en el tiempo hasta completar 150 Coulomb, siendo este valor el mínimo requerido para experimentar obtener una corrosión visible en el refuerzo. A continuación, se presentan los resultados de carga acumulada (Coulombs) de la macro celda de corrosión (compuesta por el ánodo y los cátodos) respecto a los días de ejecución del ensayo para cada una de las mezclas. Con base en este ensayo se realizaron otros ensayos como el potencial de corrosión, resistividad ánodo-cátodo y resistividad cátodo-cátodo.

7.8.1.1. Mezcla de 5000 psi.

Para esta mezcla, uno de los especímenes alcanzó una carga acumulada de 85 Coulombs, lo que quiere decir que ha entrado en un proceso de activación, mientras que la otra muestra se encuentra en estado pasivo mostrando una carga acumulada de 1.71 Coulombs. A continuación, se muestran los resultados.

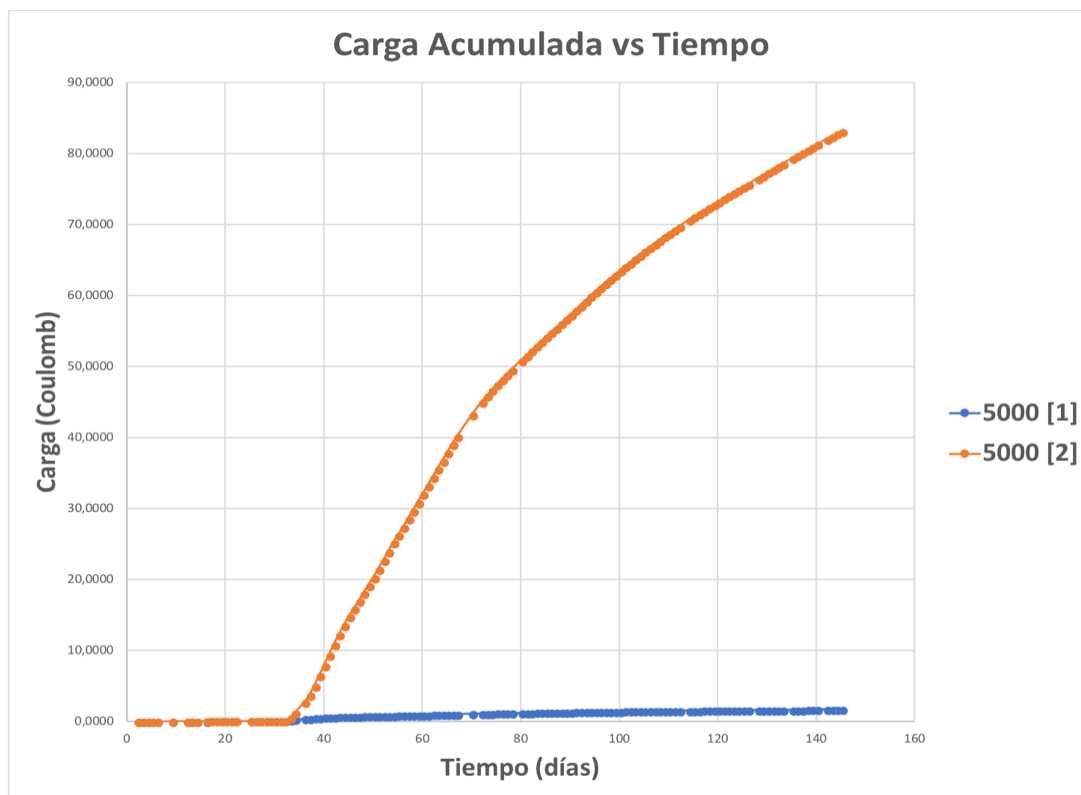


Figura 62 Carga acumulada de la macrocelda de corrosión para la mezcla de 5000 psi en función del tiempo.

7.8.1.2. Mezcla de 7000 psi.

Para la mezcla de 7000 psi, los especímenes han alcanzado una carga acumulada de 0.82 Coulombs, lo que quiere decir que se han mantenido en un estado pasivo. A continuación se muestran los resultados obtenidos en este ensayo con un período de exposición de 145 días.

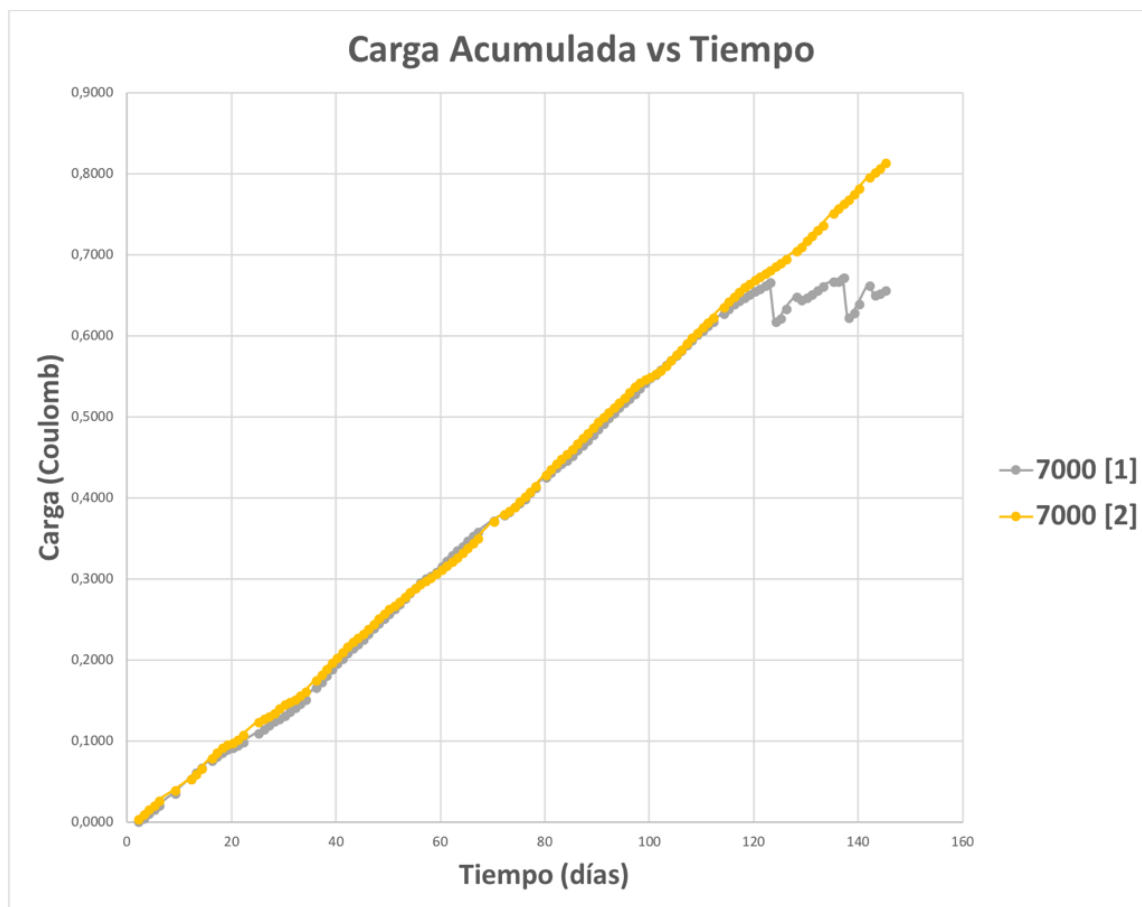


Figura 63 Carga acumulada de la macrocelda de corrosión para la mezcla de 7000 psi en función del tiempo.

7.8.1.3. Mezcla de 10000 psi.

Para la mezcla de 10000 psi, los especímenes han alcanzado una carga acumulada de 1.97 y 0.50 Coulombs respectivamente, lo que quiere decir que se han mantenido en un estado pasivo. A continuación se muestran los resultados obtenidos en este ensayo con un período de exposición de 145 días.

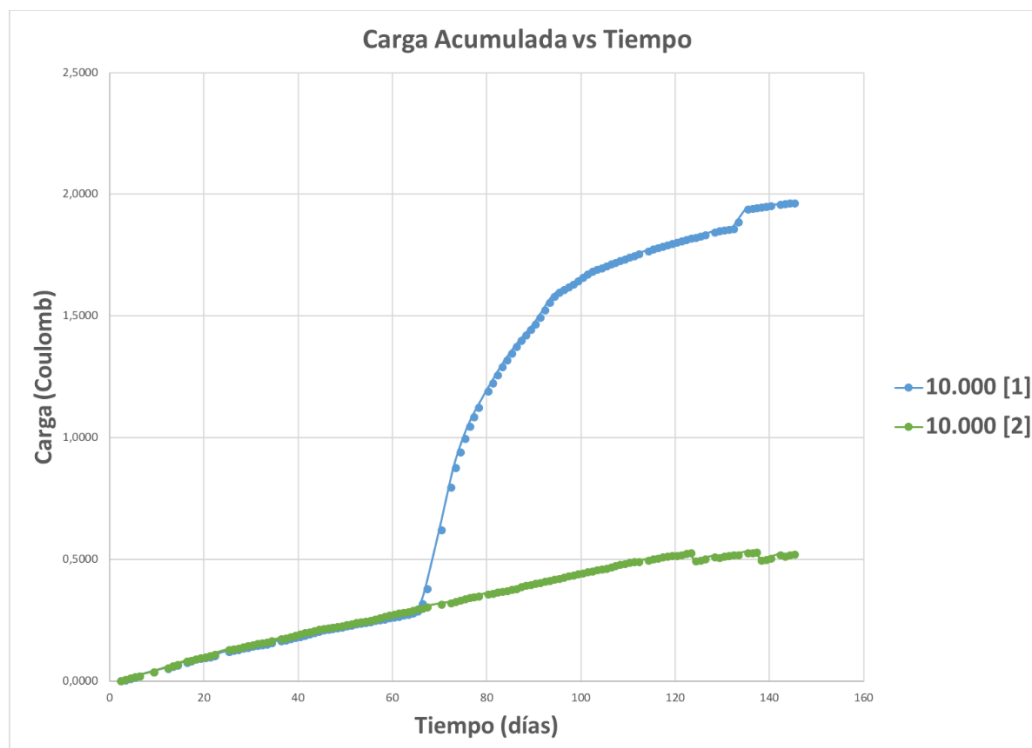


Figura 64 Carga acumulada de la macrocelda de corrosión para la mezcla de 10000 psi en función del tiempo.

7.8.2. Potencial de corrosión

Para la medición de este parámetro se registraron los datos de potencial con el electrodo de Plata/Cloruro de Plata (Ag/AgCl). Es importante resaltar que la segunda muestra de 5000 psi presenta activación debido a los resultados de los potenciales medidos, presentando un riesgo intermedio de corrosión, las demás muestras se encuentran en un estado pasivo, aún no se evidencia ninguna activación teniendo en cuenta que el período de exposición fue de 145 días. A continuación, se presenta un esquema de cómo realizaron las lecturas (Figura 65).

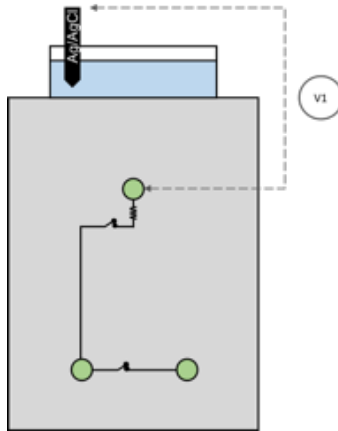


Figura 65 Esquema de mediciones de potenciales para las probetas ASTM G109.

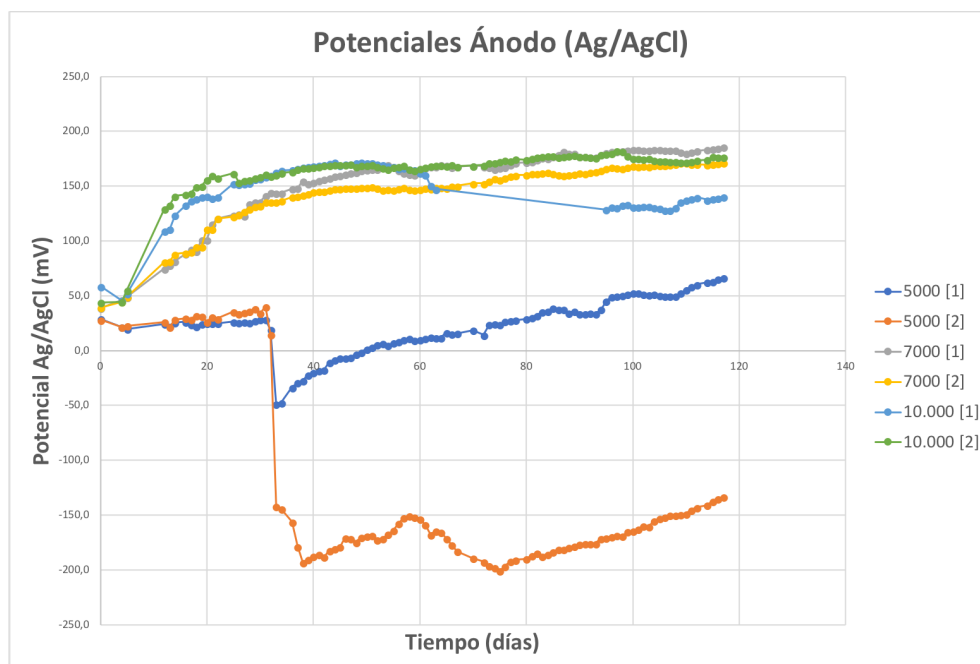


Figura 66 Registro de potenciales para los tres tipos de mezcla en función del tiempo.

7.8.3. Resistividad Ánodo-Cátodo y Cátodo-Cátodo

La resistividad medida de la macro celda entre ánodo-cátodo y entre ambos cátodos se midió entre la barra superior (ánodo) y una de las barras inferiores (cátodo). Las mediciones se realizaron de acuerdo con la figura 67. La importancia de este ensayo es monitorear la propiedad eléctrica del concreto a través del refuerzo que tiene embebido, en la medición de este parámetro se puede identificar una activación del ánodo cuando ocurre un cambio en la resistencia. De acuerdo con las figuras 68 y 70, se observan unas mediciones con poca variación.

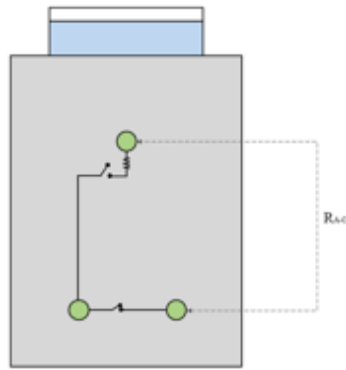


Figura 67 Esquema de medición de resistividad de entre el ánodo y el cátodo.

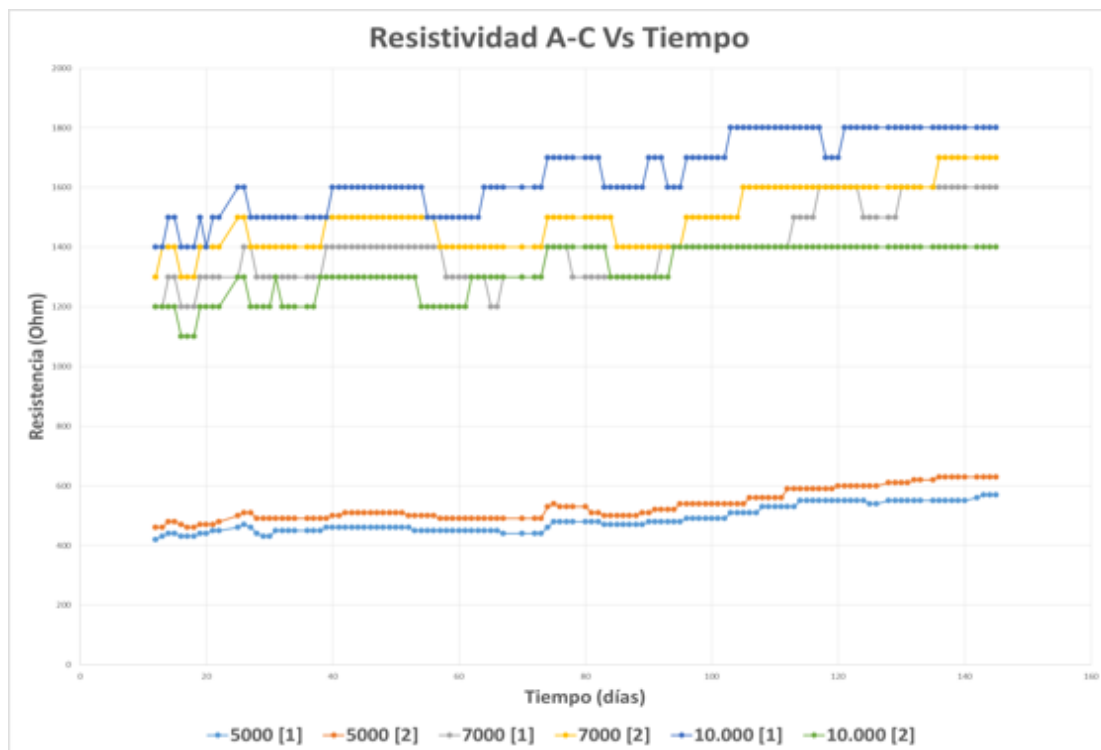


Figura 68 Resistividad ánodo-cátodo.

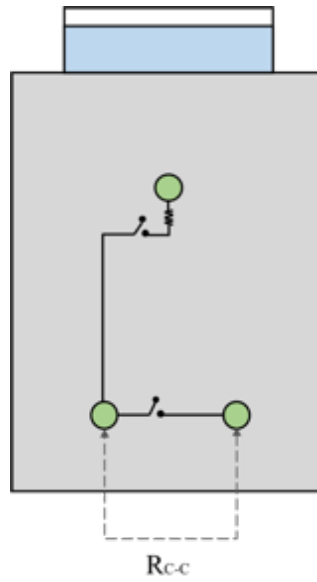


Figura 69 Esquema de medición de resistividad de entre ambos cátodos.

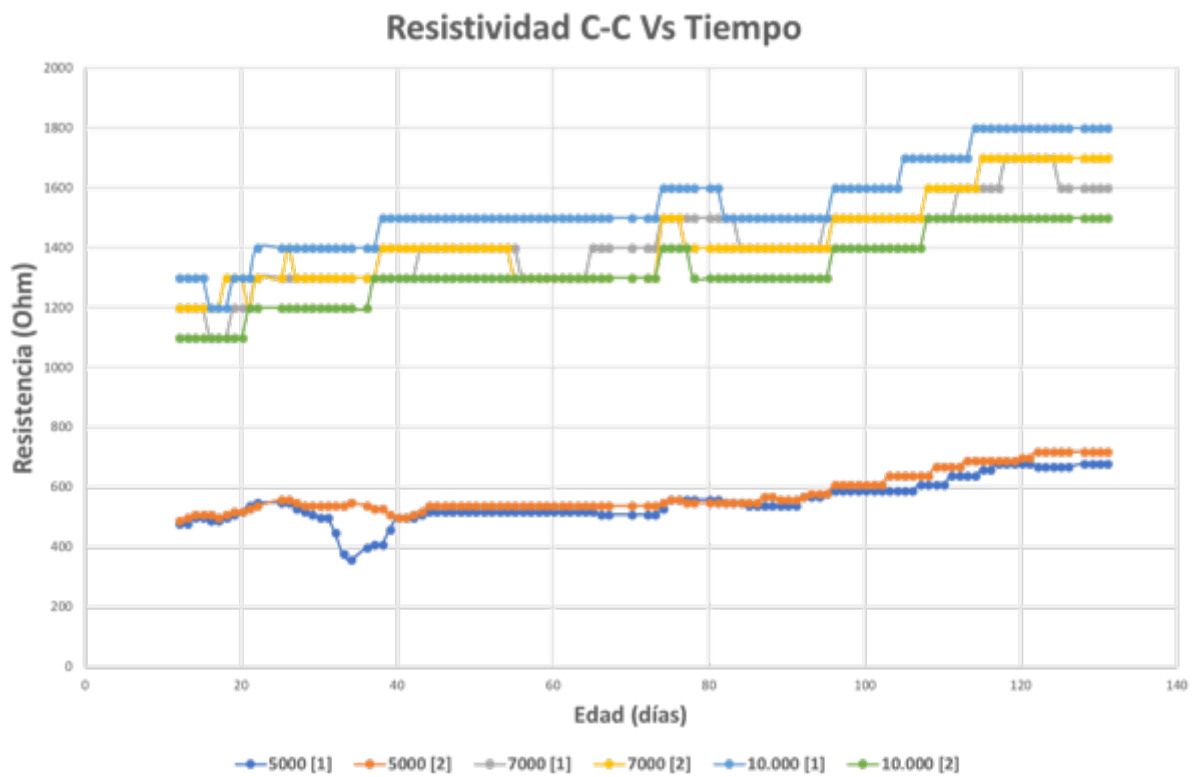


Figura 70 Resistividad cátodo-cátodo.

7.9. ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA (EIS) Y POTENCIAL DE CORROSIÓN

A continuación, se presenta el resultado de las curvas de impedancia en la cual se realizó un ajuste de los datos experimentales con el fin de obtener el valor de la Resistencia a la polarización (R_p). La geometría esperada de la curva del ensayo de EIS es un semicírculo, los resultados van siguiendo esa tendencia dependiendo si se encuentran en un estado activo o pasivo. También se registran las gráficas correspondientes al potencial de corrosión asociado a las muestras ensayadas empleando dos electrodos de referencia como lo son el electrodo de Plata/Cloruros de Plata (Ag/AgCl) y el electrodo de Cobre/Sulfato de Cobre (Cu/CuSO_4). A continuación, se muestran los resultados del aumento del potencial en función del tiempo.

7.9.1. Potencial de Corrosión de media celda (Ag/AgCl)

El potencial de la corrosión muestra la actividad del acero de refuerzo, es por ellos que se registran los resultados diarios correspondiente a este parámetro y se reportan después de haber estado expuestas por un período de 200 días.

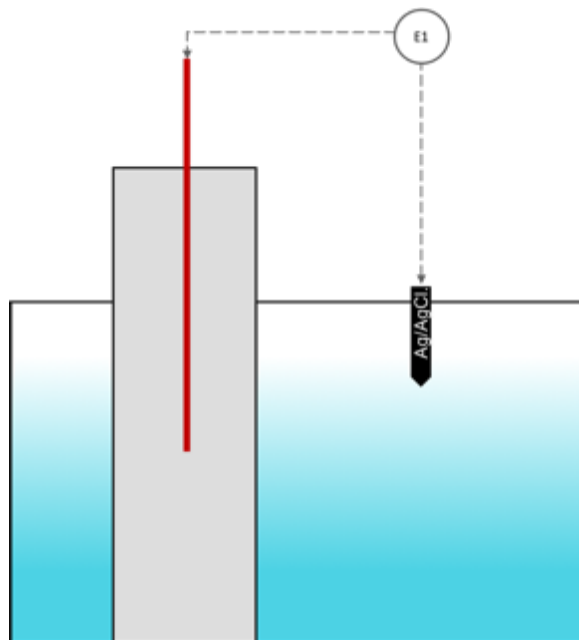


Figura 71 Esquema de toma de datos para el ensayo de potencial de media celda (Ag/AgCl)

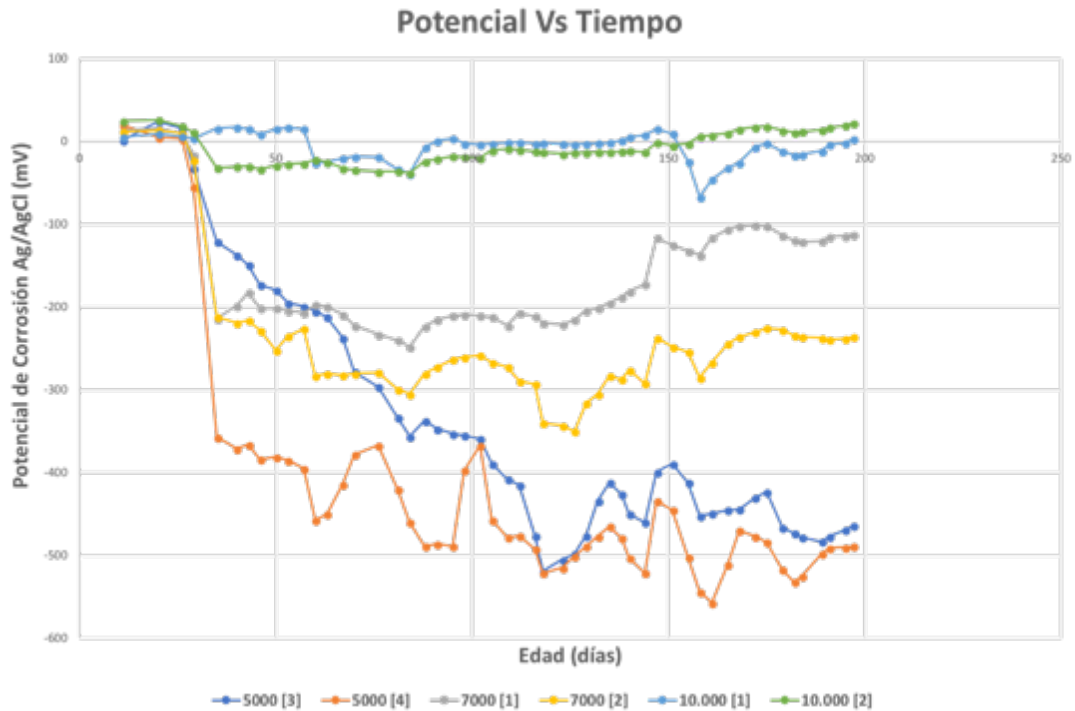


Figura 72 Potencial de corrosión de media celda en función del tiempo (Ag/AgCl)

7.9.1. Potencial de Corrosión de media celda (Cu/CuSO₄)

También se realizaron lecturas correspondientes al potencial de media celda empleando otro electrodo de referencia llamado cobre/sulfato de cobre. El período de exposición fue el mismo y las lecturas fueron tomadas como se muestra en la figura 73. A continuación se presentan los resultados de los potenciales.

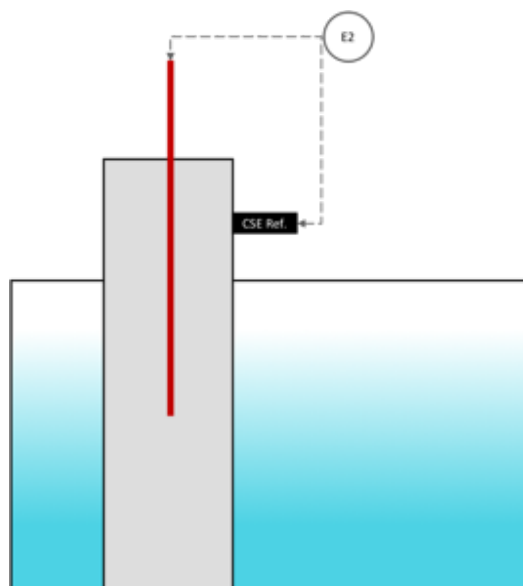


Figura 73 Esquema de toma de datos para el ensayo de potencial de media celda (Cu/CuSO₄)

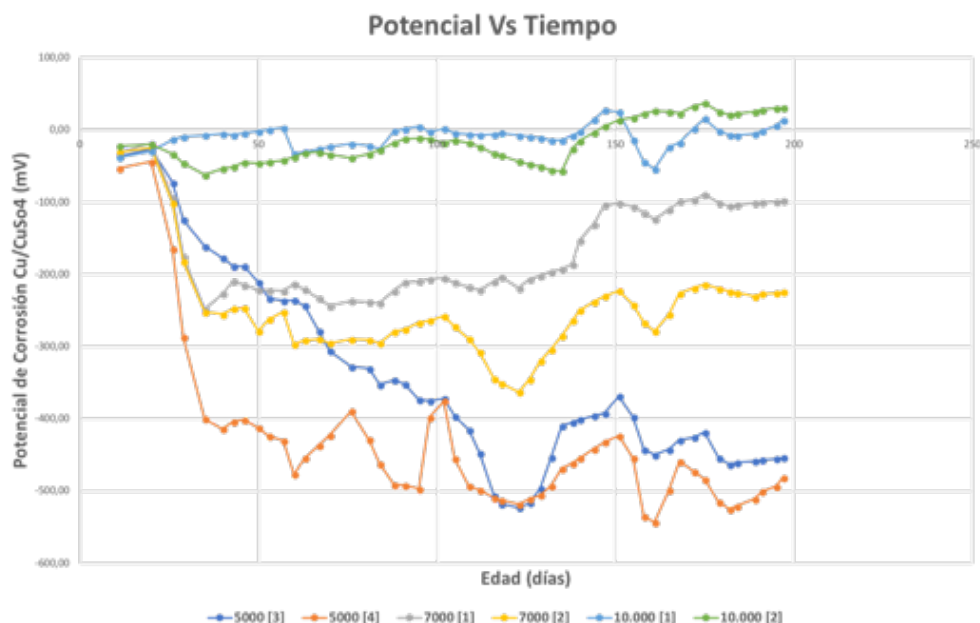


Figura 74 Potencial de corrosión de media celda en función del tiempo (Cu/CuSO₄)

7.9.2. Primer mes del ensayo de EIS

Este ensayo tuvo un seguimiento semanal para identificar su evolución en el tiempo, los resultados a continuación corresponden a la evolución mensual de estas muestras con sus respectivos valores promedio de resistencia a la polarización (R_p).

De acuerdo con los resultados obtenidos para este primer mes, se observan valores con poca variación en las mezclas de 5000 psi, al igual que con las mezclas de 7000 psi. Para el caso de las mezclas de 10000 psi hubo una variación a la edad de 112 días donde se registra un valor bastante alto en comparación con los que registró a la edad de 123 y 133 días. A continuación, se presentan los valores para este primer mes de ensayos con sus respectivas gráficas asociadas a cada muestra (figuras 75-80).

Tabla 37 Valores de resistencia a la polarización para el primer mes de ensayo

ID	R_p (kOhm)			
	t (días)			
	105	112	123	133
5000 - 3	2,80	3,33	2,85	2,99
5000 - 4	2,31	2,03	2,01	2,10
7000 - 1	20,93	20,12	20,59	25,02
7000 - 2	11,14	9,00	7,95	10,39
10000 - 1	893,60	1017,00	564,10	594,50
10000 - 2	326,70	327,50	314,00	255,90

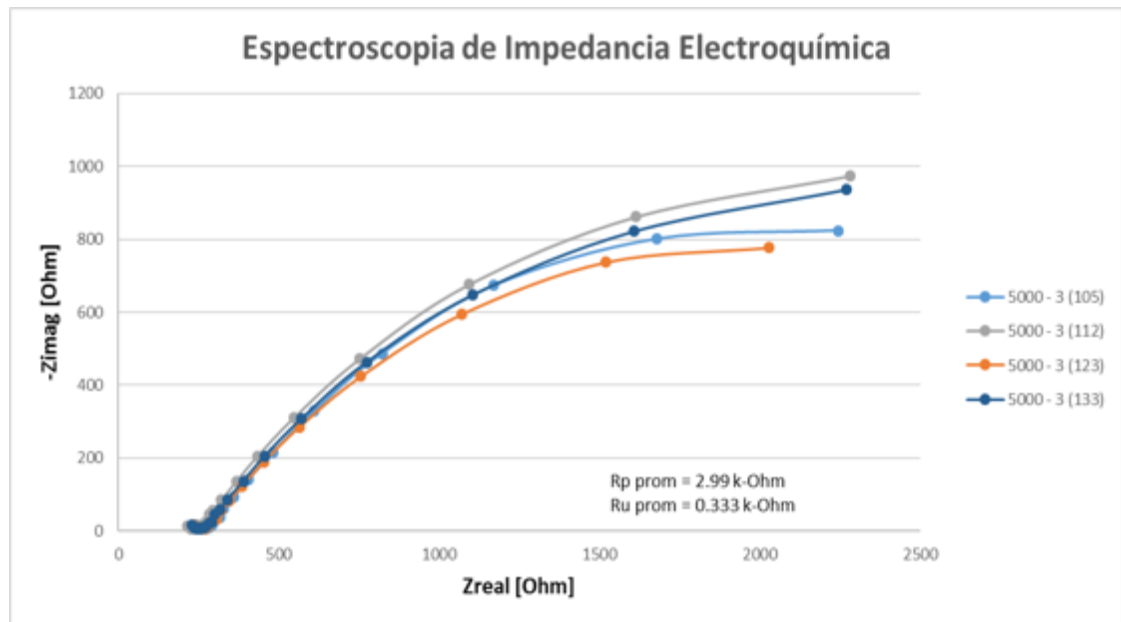


Figura 75 Resultado del ensayo para la mezcla 5000-3 para el primer mes de ensayos.

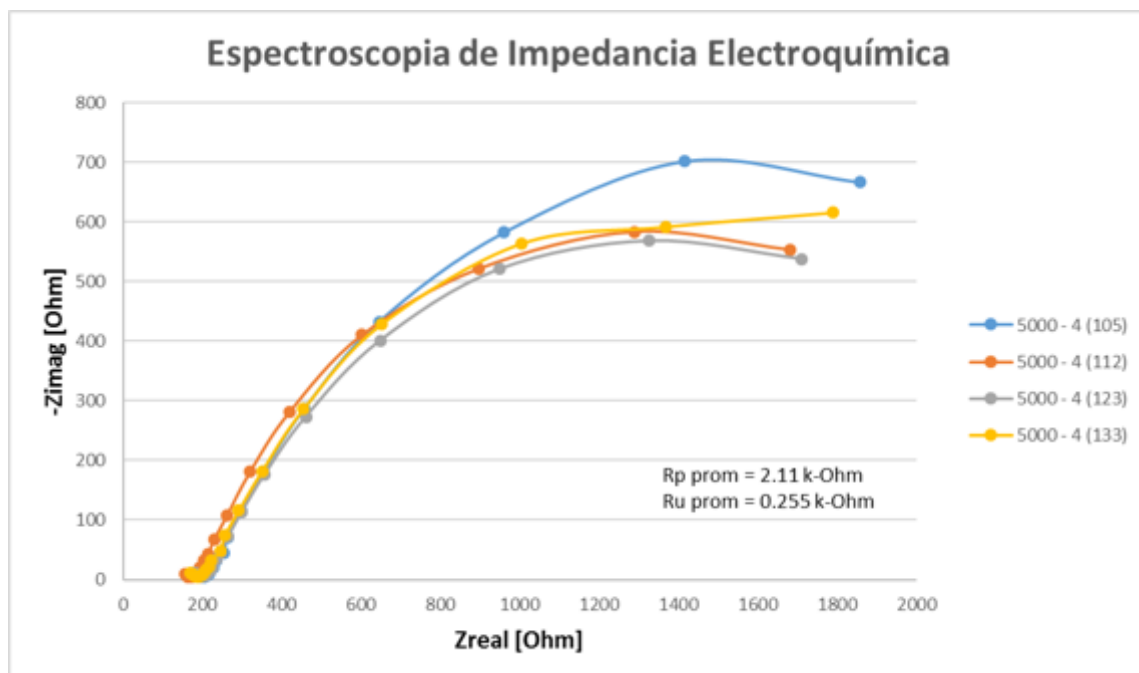


Figura 76 Resultado del ensayo para la mezcla 5000-4 para el primer mes de ensayos.

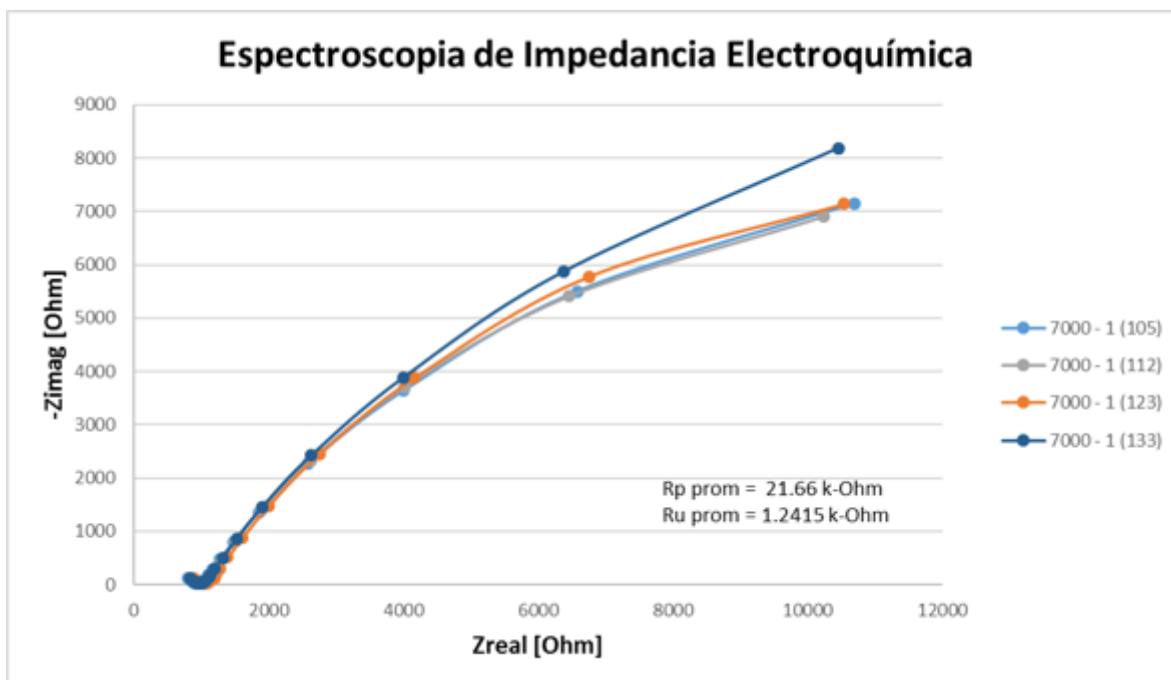


Figura 77 Resultado del ensayo para la mezcla 7000-1 para el primer mes de ensayos.

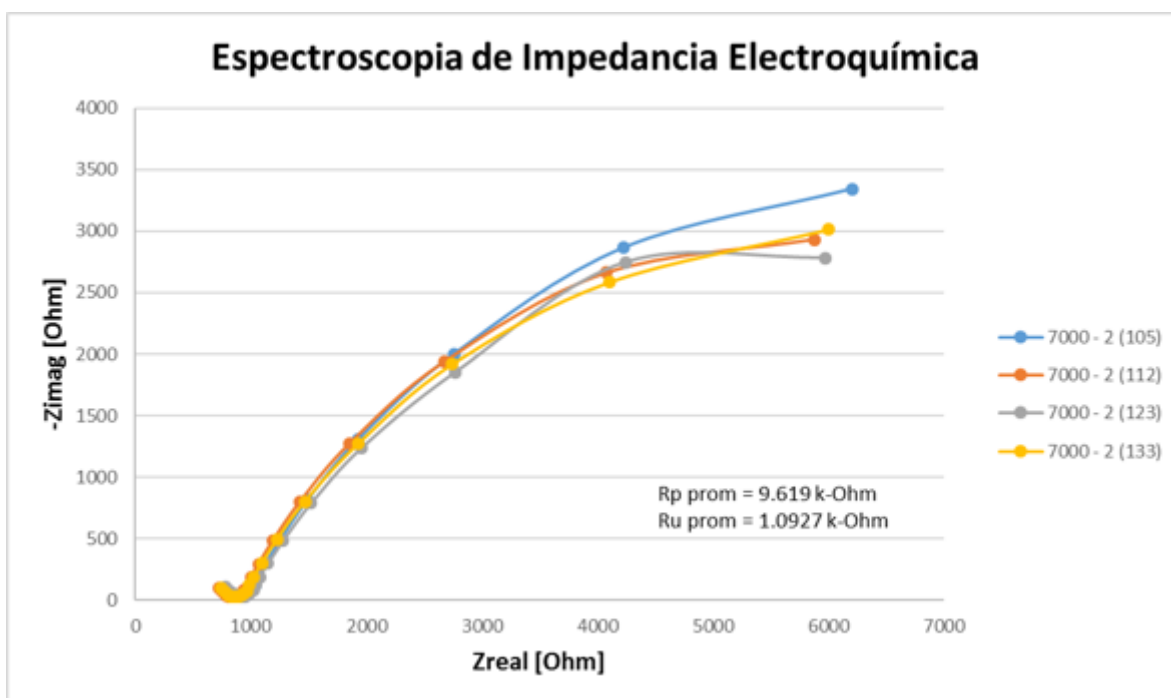


Figura 78 Resultado del ensayo para la mezcla 7000-2 para el primer mes de ensayos.

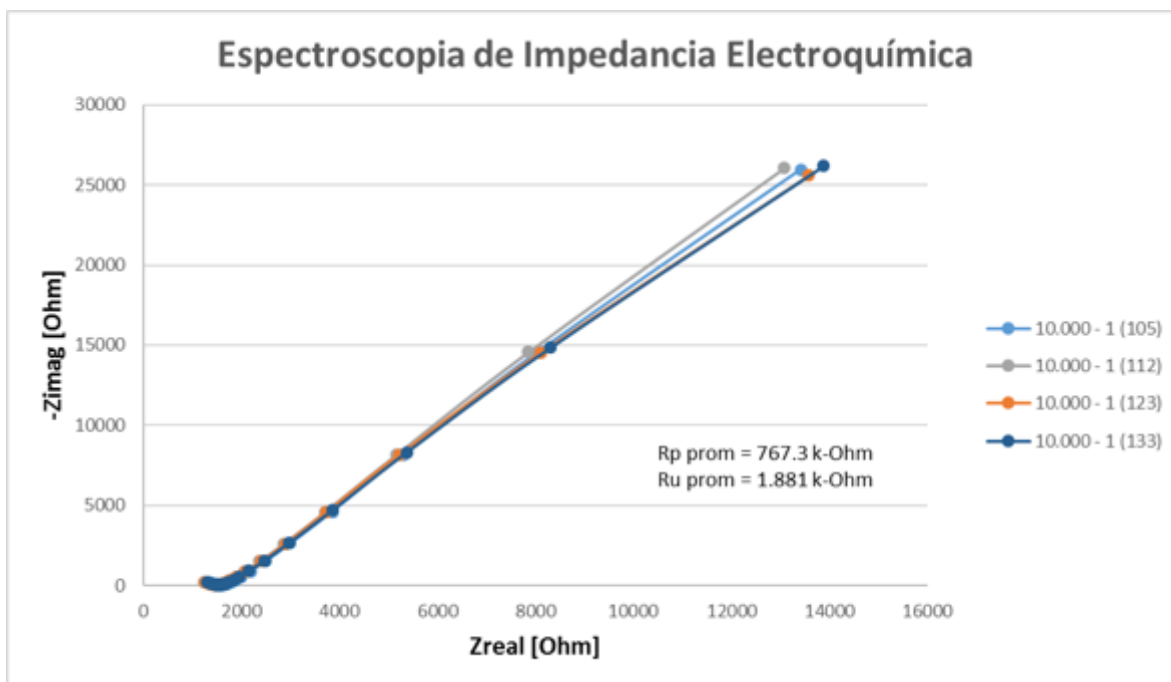


Figura 79 Resultado del ensayo para la mezcla 10000-1 para el primer mes de ensayos.

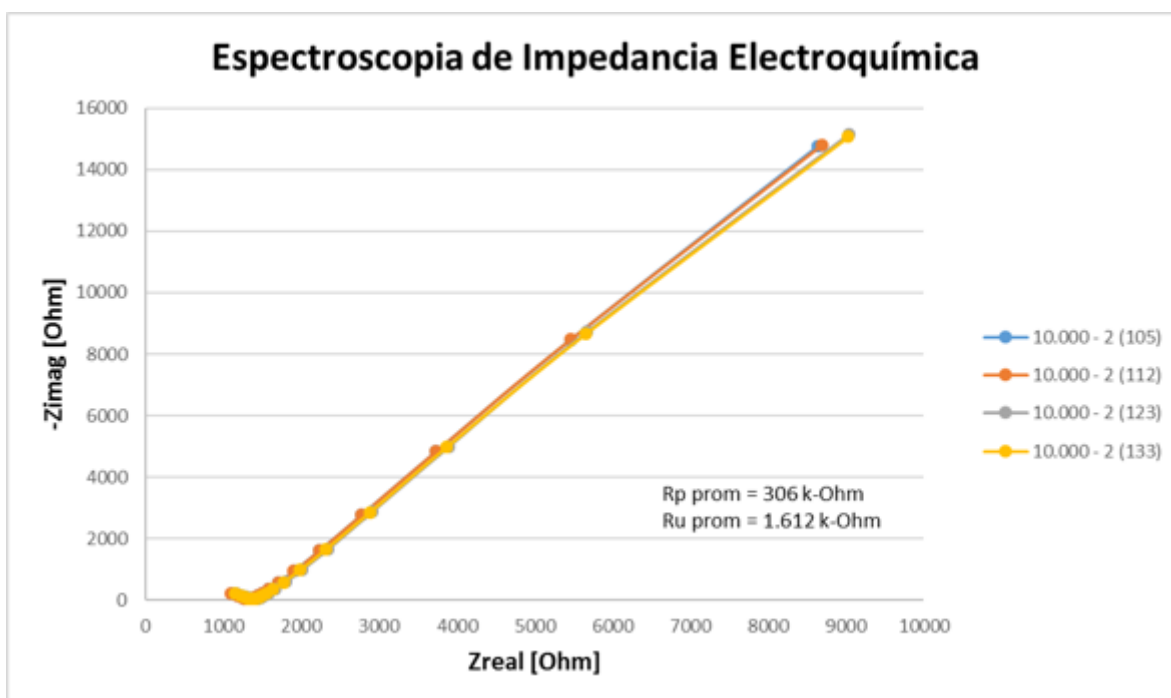


Figura 80 Resultado del ensayo para la mezcla 10000-2 para el primer mes de ensayos.

7.9.1. Segundo mes del ensayo de EIS

Para el segundo mes, los resultados obtenidos se observan con poca variación en las mezclas de 5000 y 7000 psi. Las mezclas de 10000 psi volvieron a mostrar variación a la edad de 162 días donde se registra un valor bastante bajo en comparación con los que registró en las otras edades. A continuación, se registran los valores para el segundo mes de ensayos con sus respectivas gráficas asociadas a cada muestra (figuras 81-86).

Tabla 38 Valores de resistencia a la polarización para el segundo mes de ensayo

ID	Rp (kOhm)			
	t (días)			
	140	147	154	162
5000 - 3	1,61	2,50	1,88	2,24
5000 - 4	2,05	2,88	1,02	1,34
7000 - 1	26,96	38,42	39,79	44,77
7000 - 2	8,95	10,89	9,15	10,90
10000 - 1	946,30	758,10	625,00	170,60
10000 - 2	309,50	275,00	306,10	263,70

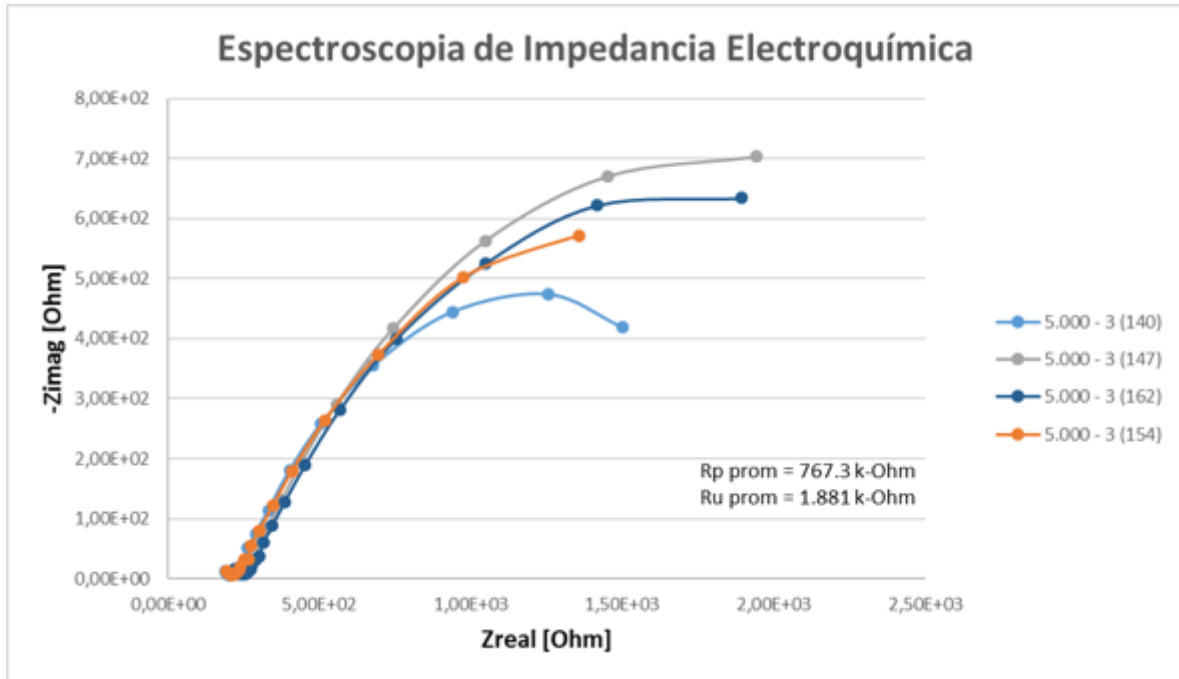


Figura 81 Resultado del ensayo para la mezcla 5000-3 para el segundo mes de ensayos.

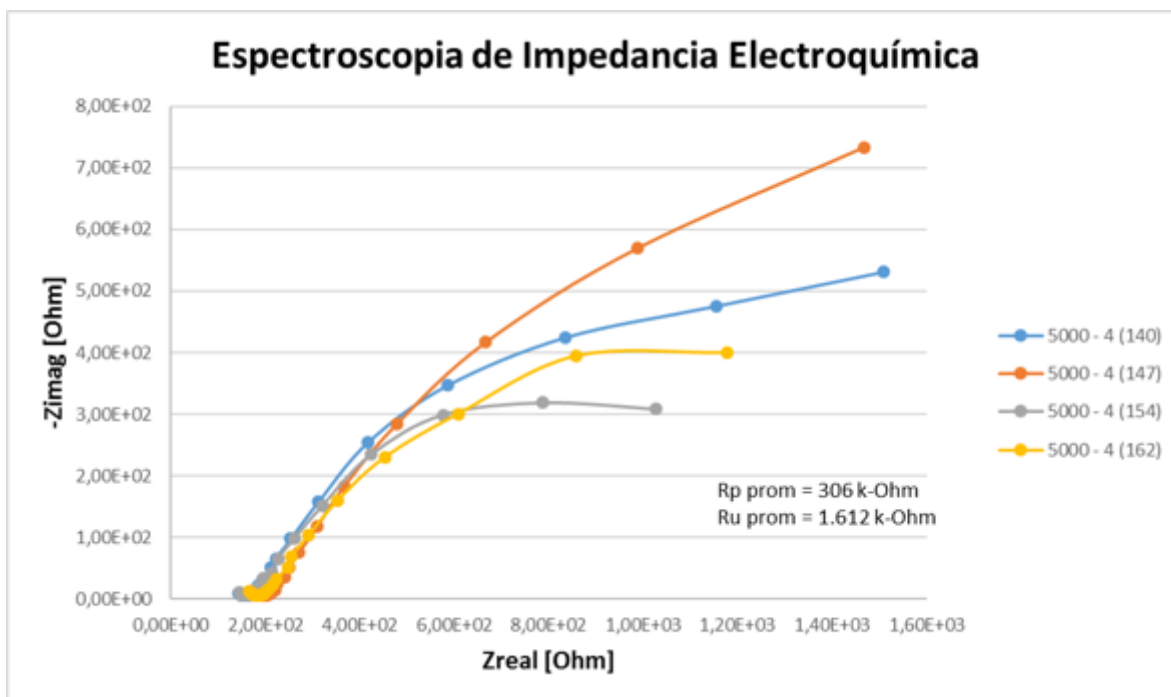


Figura 82 Resultado del ensayo para la mezcla 5000-4 para el segundo mes de ensayos.

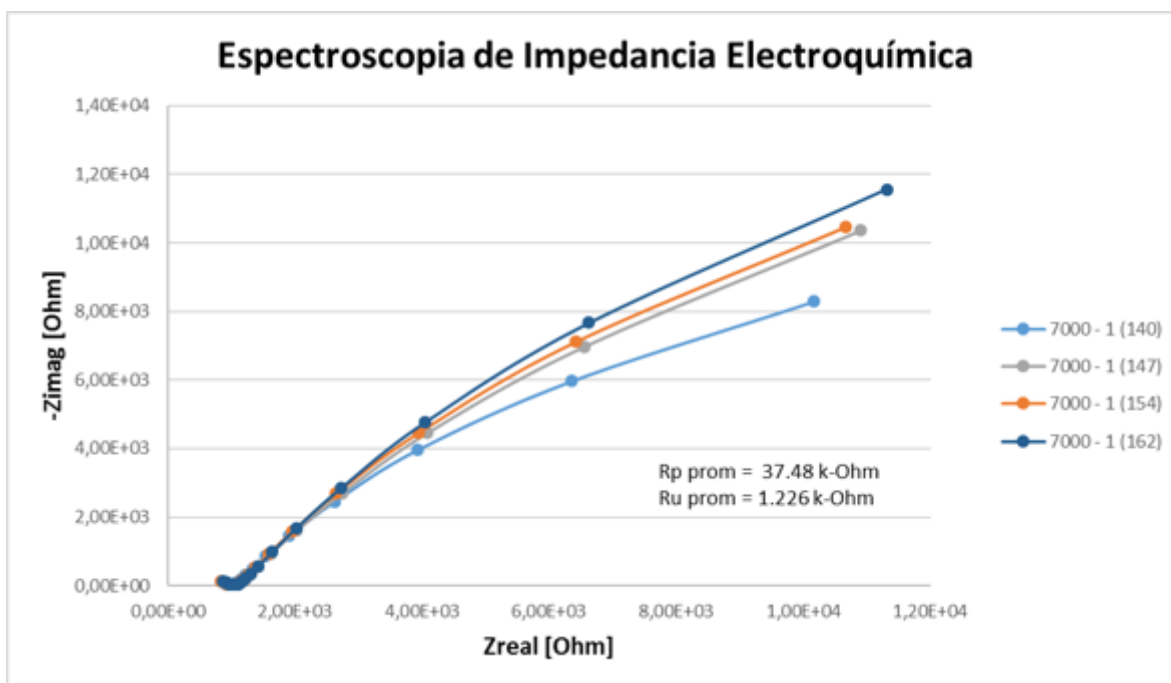


Figura 83 Resultado del ensayo para la mezcla 7000-1 para el segundo mes de ensayos.

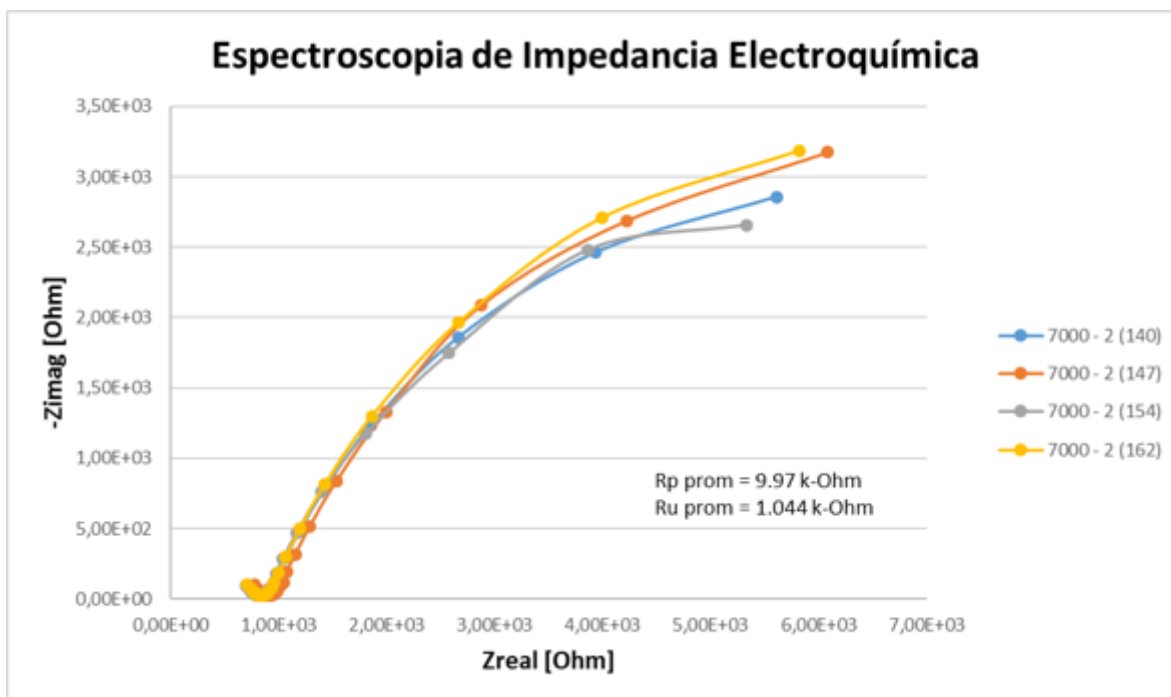


Figura 84 Resultado del ensayo para la mezcla 7000-2 para el segundo mes de ensayos.

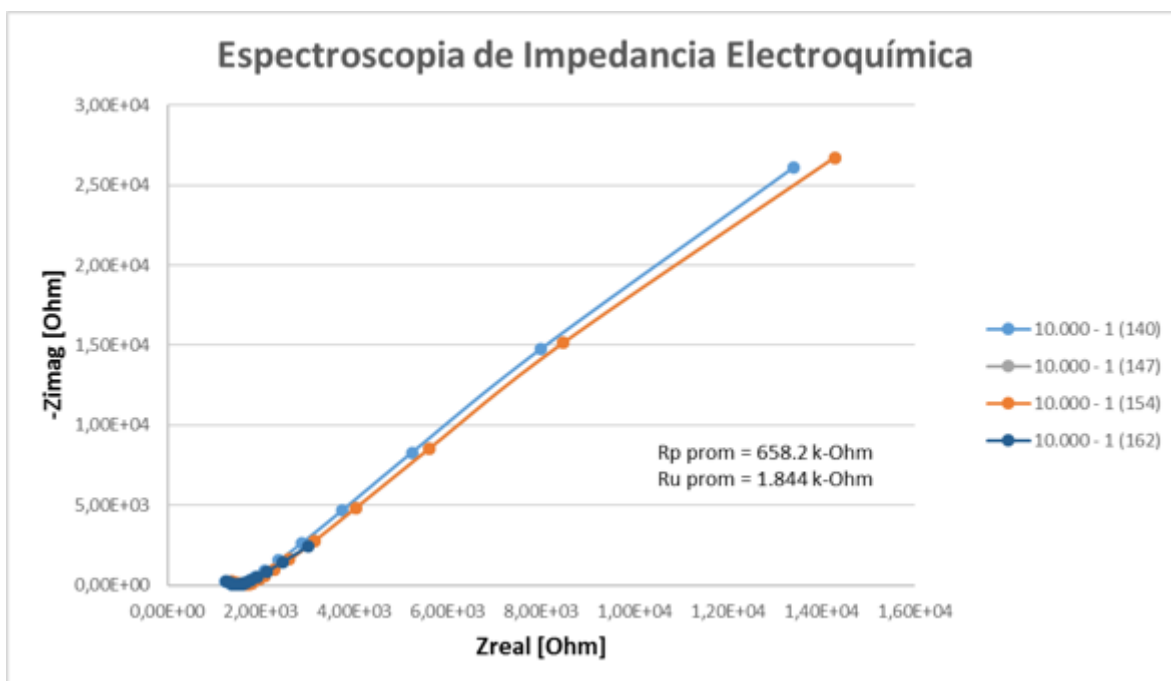


Figura 85 Resultado del ensayo para la mezcla 10000-1 para el segundo mes de ensayos.

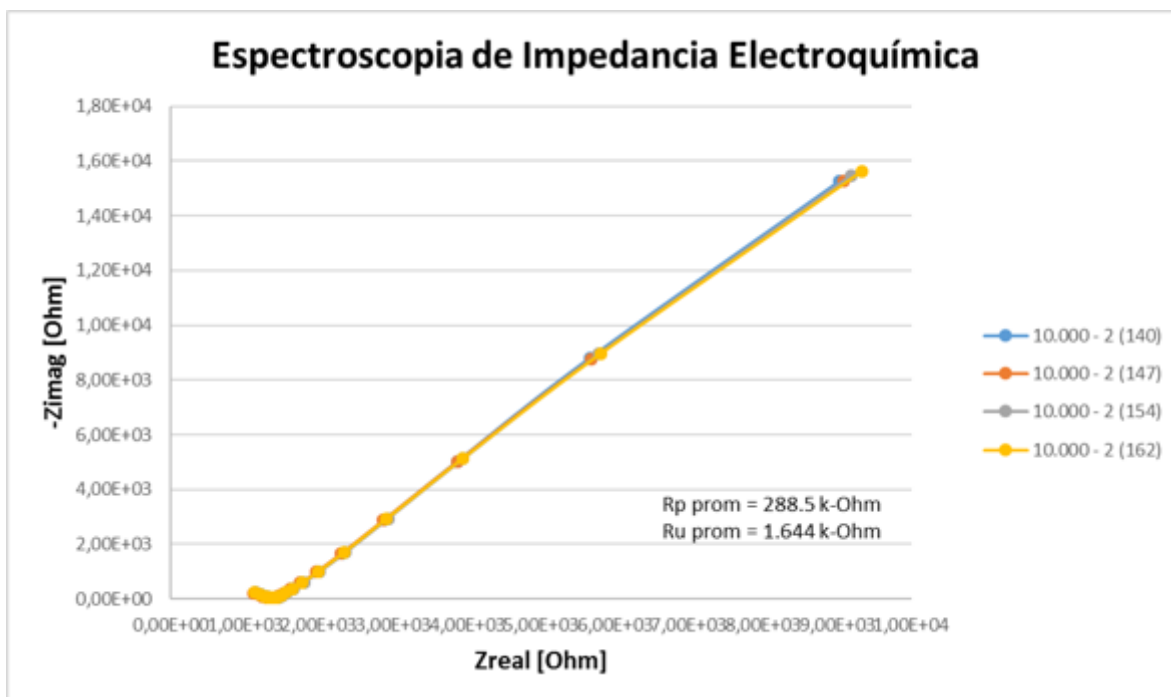


Figura 86 Resultado del ensayo para la mezcla 10000-2 para el segundo mes de ensayos.

7.9.1. Tercer mes del ensayo de EIS

Para el último mes de ensayos, los resultados obtenidos se observan ligeramente constantes para las mezclas de 5000, 7000 y 10000 psi. A continuación, se presentan los valores para este tercer mes de ensayos, junto con las gráficas variando el tiempo de exposición de las muestras (figuras 87-92).

Tabla 39 Valores de resistencia a la polarización para el tercer mes de ensayo

ID	Rp (kOhm)			
	t (días)			
	169	177	184	191
5000 - 3	2,18	2,16	2,28	2,24
5000 - 4	1,49	1,13	1,20	0,98
7000 - 1	44,80	50,94	45,44	48,47
7000 - 2	10,60	11,54	12,95	10,91
10000 - 1	182,80	140,65	73,57	132,4
10000 - 2	274,70	350,20	282,40	316,70

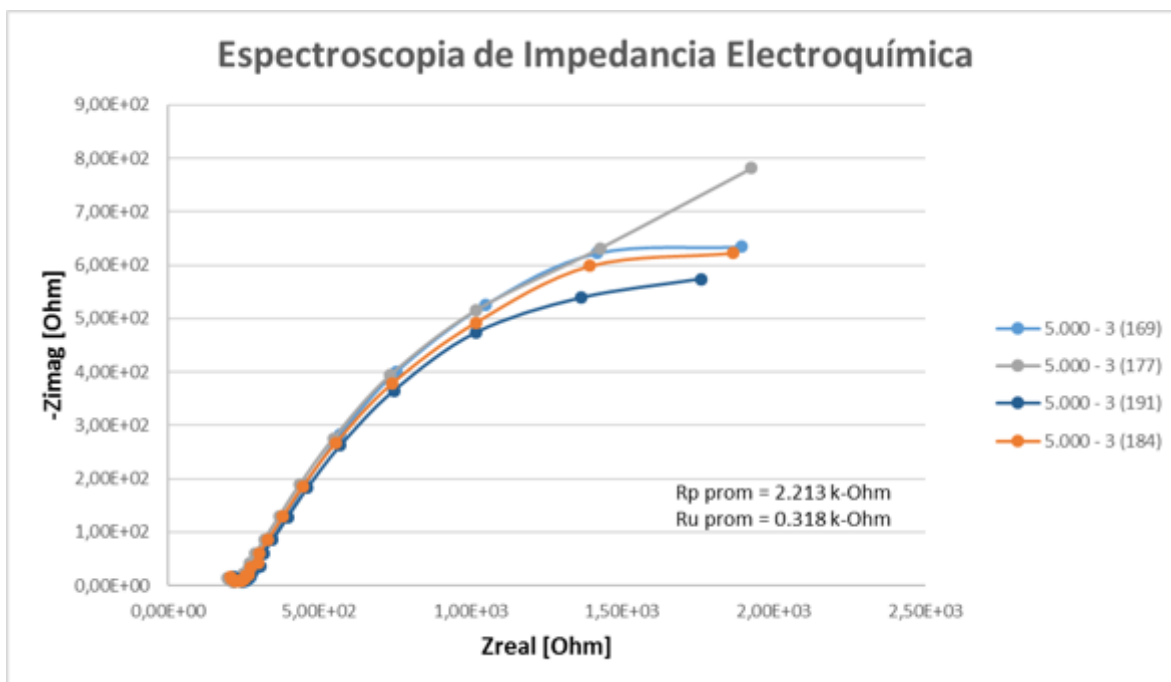


Figura 87 Resultado del ensayo para la mezcla 5000-3 para el tercer mes de ensayos.

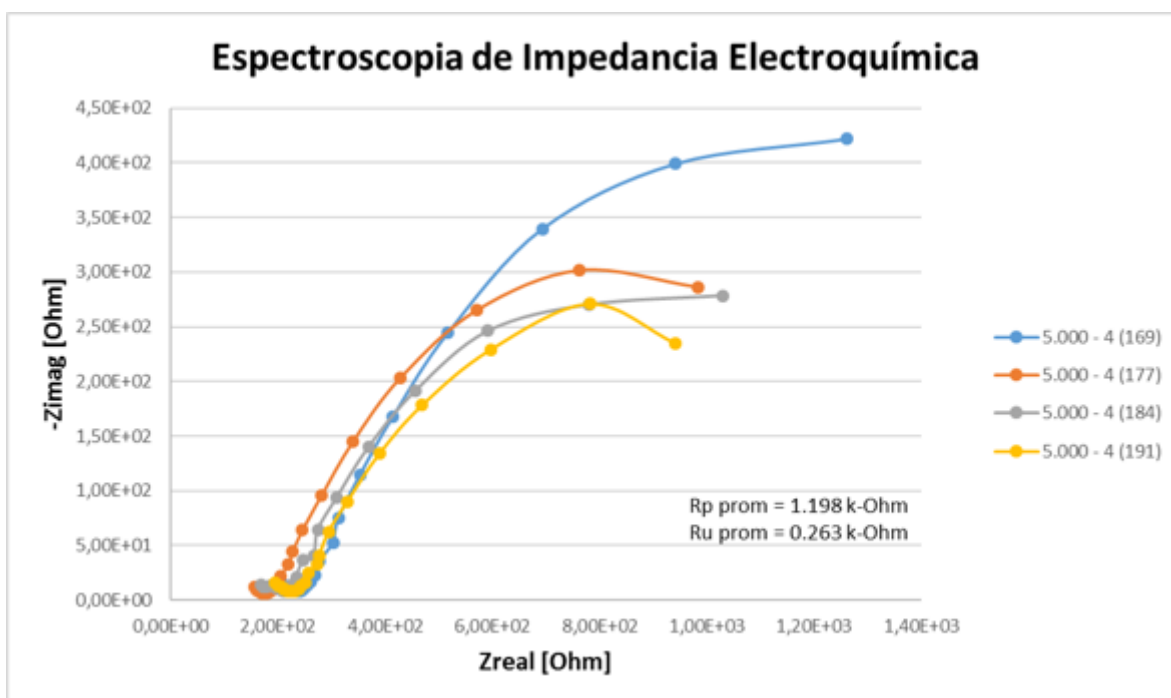


Figura 88 Resultado del ensayo para la mezcla 5000-4 para el tercer mes de ensayos.

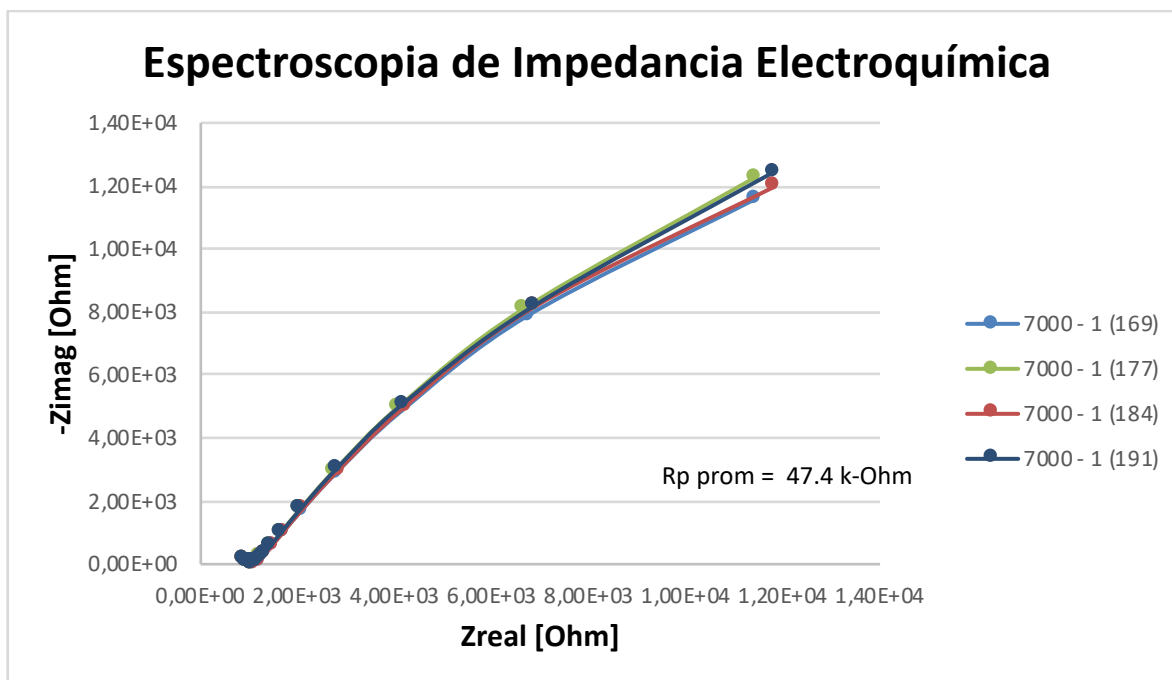


Figura 89 Resultado del ensayo para la mezcla 7000-1 para el tercer mes de ensayos.

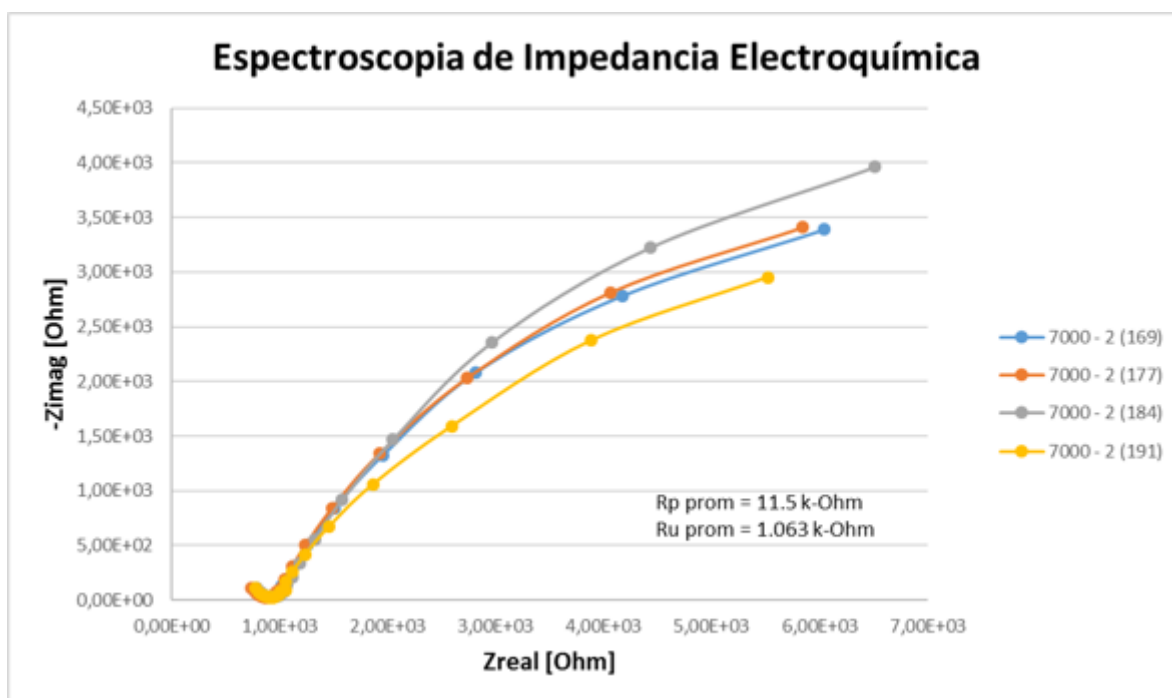


Figura 90 Resultado del ensayo para la mezcla 7000-2 para el tercer mes de ensayos.

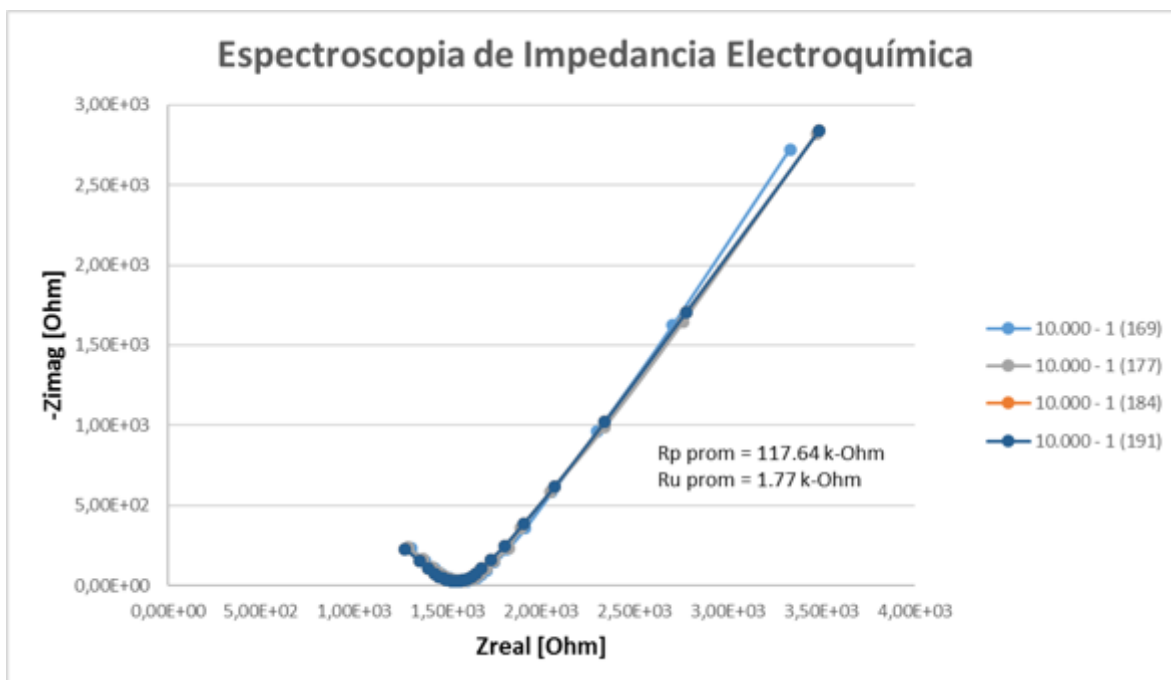


Figura 91 Resultado del ensayo para la mezcla 10000-1 para el tercer mes de ensayos.

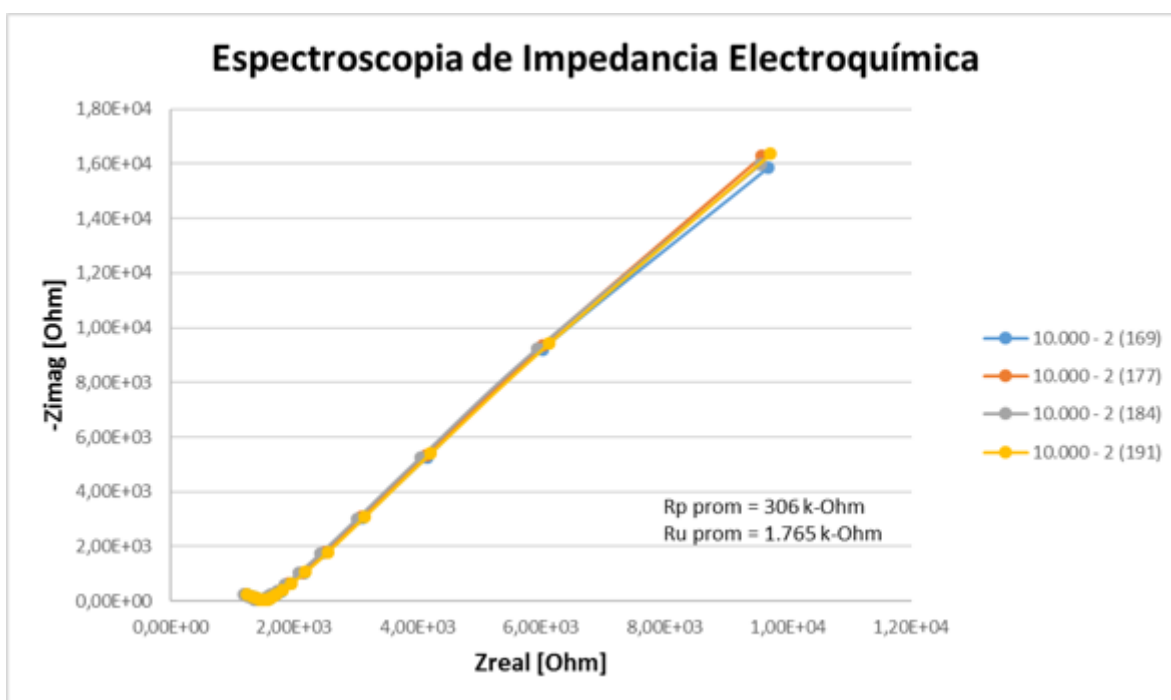


Figura 92 Resultado del ensayo para la mezcla 10000-2 para el tercer mes de ensayos.

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La vida de servicio de las estructuras de concreto reforzado depende entre otros factores de la protección proporcionada por el recubrimiento de concreto ante la susceptibilidad del acero de refuerzo al ambiente corrosivo (cloruros, carbonatación). Es por eso que la evaluación de la durabilidad de las mezclas en estudio representa un aporte importante en la caracterización de mezclas de concreto y pronóstico del desempeño durante la vida útil de las estructuras. En esta sección se presentan los resultados y las principales correlaciones encontradas entre los parámetros de durabilidad evaluados.

8.1.1 Correlación Velocidad de pulso ultrasónico vs Resistencia a la compresión.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede observar que la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) aumenta a medida que aumenta la resistencia a la compresión de los especímenes de concreto ensayados (Figuras 93, 94 y 95). Es por ello que se establece una relación lineal, debido a los aumentos proporcionales que van teniendo las muestras en las diferentes edades de curado. En esta gráfica se podría proyectar la resistencia a la compresión de un concreto con las mismas características (agregados, relación agua/material cementante, tipo de cemento, condiciones de curado, etc.) a partir de los resultados de VPU obtenidos en cilindros o núcleos de concreto, teniendo en cuenta la correlación propuesta entre estas dos variables que se indica en la ecuación 12.

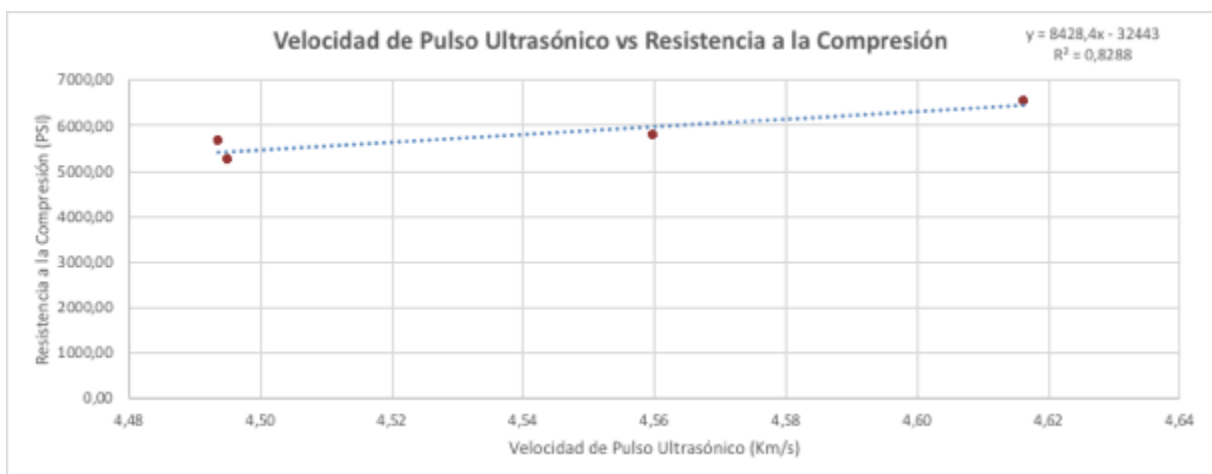


Figura 93 Velocidad de pulso ultrasónico vs Resistencia a la compresión para el concreto de 5000 psi.

$$f'c = 8428 Vc - 32443 \text{ [psi]} \quad (12)$$

$Vc \text{ en [km/s]}$

Para la mezcla de 7000 psi, se puede calcular la resistencia a la compresión del concreto, teniendo en cuenta el ajuste realizado a las mezclas empleando la ecuación 13.

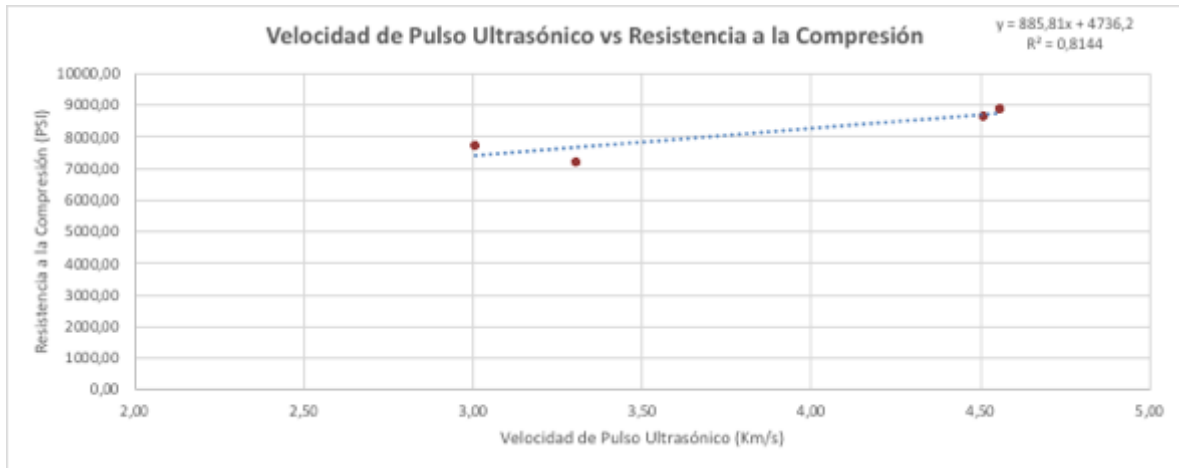


Figura 94 Velocidad de pulso ultrasónico vs Resistencia a la compresión para el concreto de 7000 psi.

$$f'c = 885,81 Vc + 4736,2 \text{ [psi]} \quad (13)$$

$Vc \text{ en [km/s]}$

Para la mezcla de 10000 psi no se consiguió el mejor ajuste debido a los resultados en la prueba de resistencia a la compresión, sin embargo una línea de tendencia con ajuste lineal es la que mejor se acomoda a los datos.

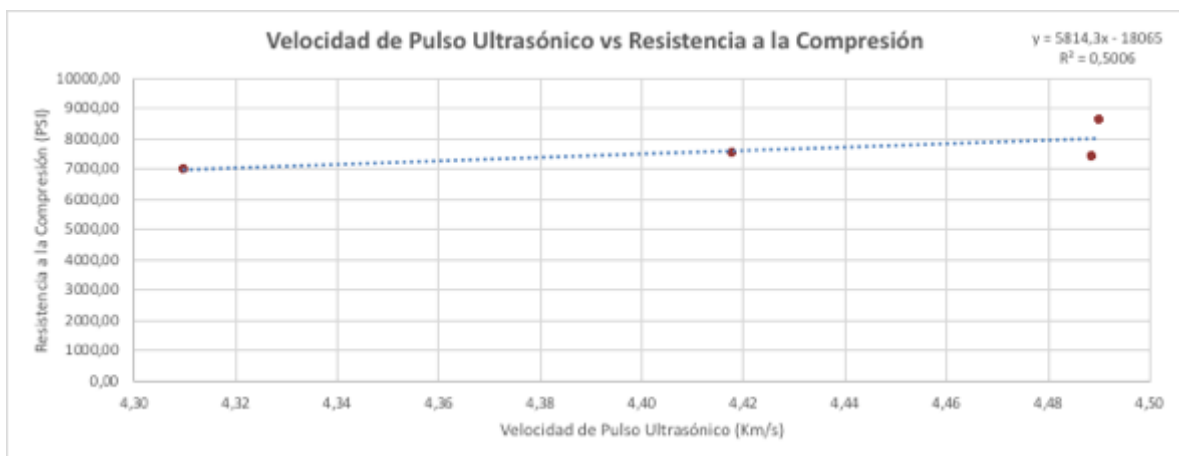


Figura 95 Velocidad de pulso ultrasónico vs Resistencia a la compresión para el concreto de 10000 psi.

$$f'c = 5815,3 Vc + 18065 \text{ [psi]} \quad (14)$$

$Vc \text{ en [km/s]}$

8.1.2 Correlación Resistividad vs Resistencia a la compresión.

Como está descrito anteriormente, con el transcurrir del tiempo, el concreto va refinando su red de poros y mejorando sus propiedades físicas y mecánicas. Este proceso afecta directamente el parámetro de resistividad del concreto haciendo a el concreto un material de mayor resistividad que produce una disminución en el flujo de la corriente a través de este y por ende retardando el proceso de corrosión. Para este caso, de acuerdo a la Figura 96, se identifica un ajuste lineal el cual representa cómo varía esta propiedad eléctrica del concreto respecto al tiempo de curado. Con estos datos se puede realizar una proyección de la resistencia a la compresión, teniendo el parámetro de resistencia eléctrica.

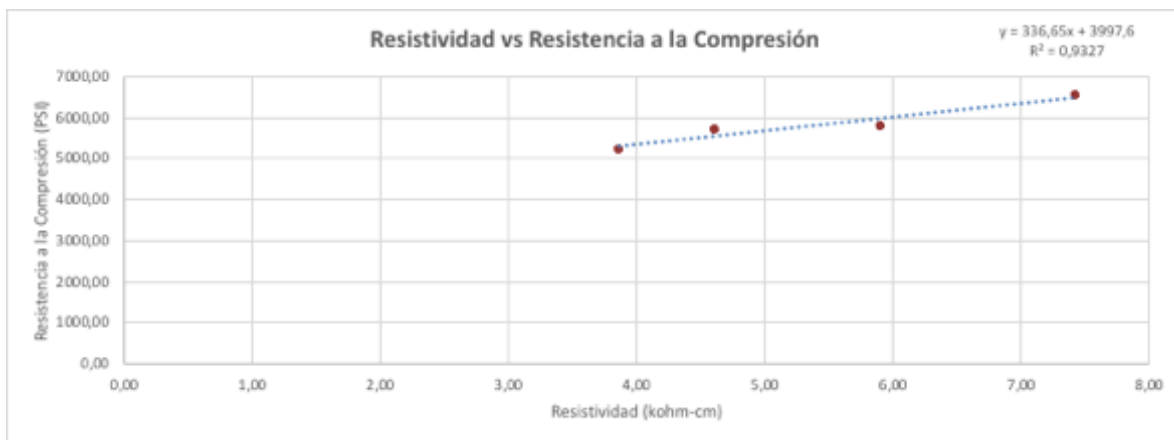


Figura 96 Resistividad vs Resistencia a la compresión para el concreto de 5000 psi.

$$\begin{aligned} f'c &= 336,65 \rho + 3997,6 \text{ [psi]} \\ \rho &\text{ en [kohm - cm]} \end{aligned} \quad (15)$$

Para el concreto de 7000 psi también se realizó un ajuste lineal empleando los datos experimentales, con el fin de formular una ecuación de correlación que permita proyectar la resistencia mecánica y su evolución en el tiempo. A continuación, se presenta la ecuación de correlación.

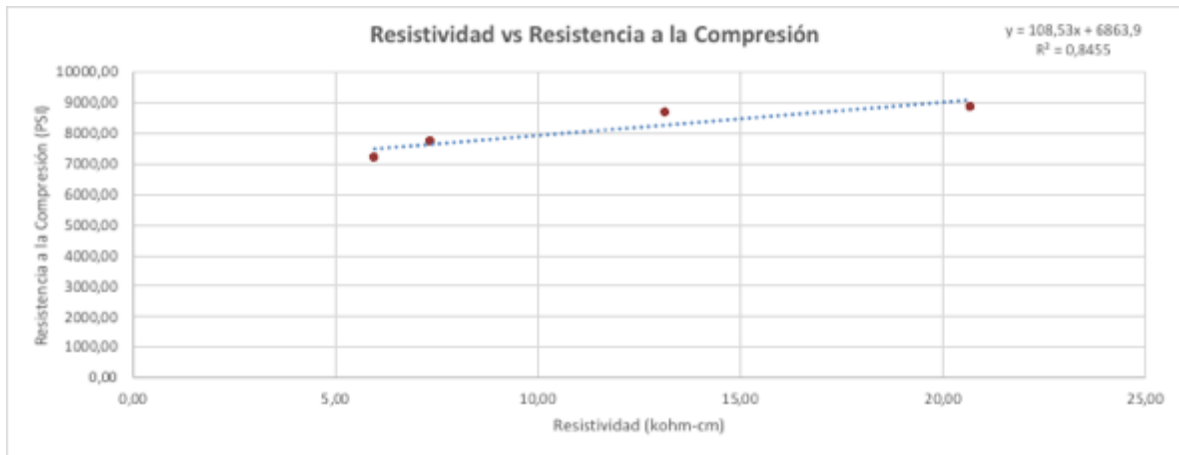


Figura 97 Resistividad vs Resistencia a la compresión para el concreto de 7000 psi.

$$f'c = 108,53 \rho + 6863,9 \text{ [psi]} \quad (16)$$

ρ en [kohm – cm]

Por último, para la mezcla de 10000 psi, también se realizó un ajuste, sin embargo, esta función no tiene el mejor comportamiento ya que el coeficiente de determinación es muy bajo. Sin embargo, otro tipo de ajuste no mejoraría las proyecciones. La ecuación de la curva de ajuste es:

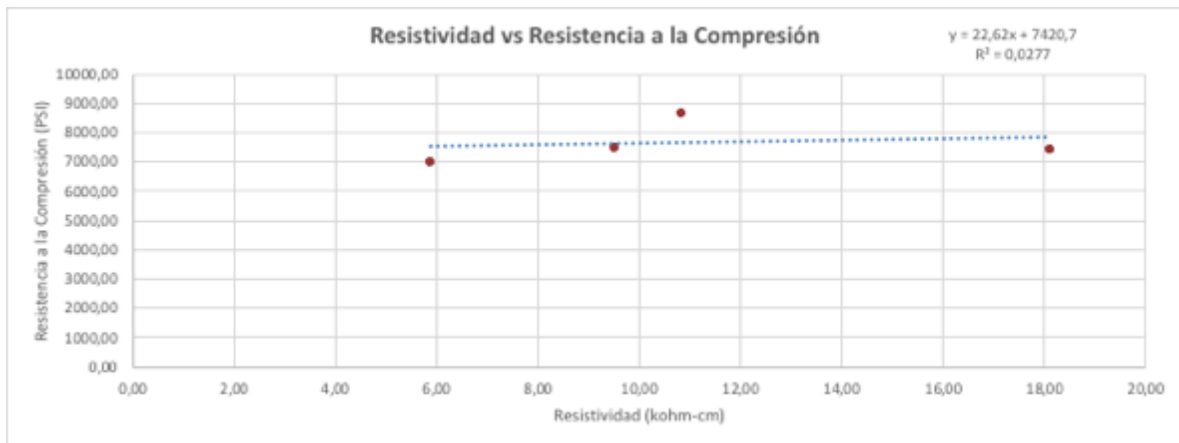


Figura 98 Resistividad vs Resistencia a la compresión para el concreto de 10000 psi.

$$f'c = 22,62 \rho + 7420,7 \text{ [psi]} \quad (17)$$

ρ en [kohm – cm]

Estas correlaciones pueden ser usadas para predecir la resistencia a la compresión del concreto a diferentes edades de curado, ya sea empleando datos de VPU o resistividad. En los últimos años, el ensayo de resistividad ha sido empleado con miras de controlar la

calidad de mezclas de concreto durante el tiempo de curado y las mediciones tomadas en campo podrían ayudar a categorizar los concretos de acuerdo a la probabilidad de ocurrencia de la corrosión.

Los resultados que se presentan a continuación, también fueron ajustados con tendencia lineal, y muestra correlaciones entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistividad del concreto. El parámetro que nos permite conocer que tan bien se ajustan los datos a la tendencia aplicada es el R^2 , del cual obtuvimos valores entre 0.75 y 0.95, exceptuando la mezcla de 10000 psi que arroja un R^2 de 0.027.

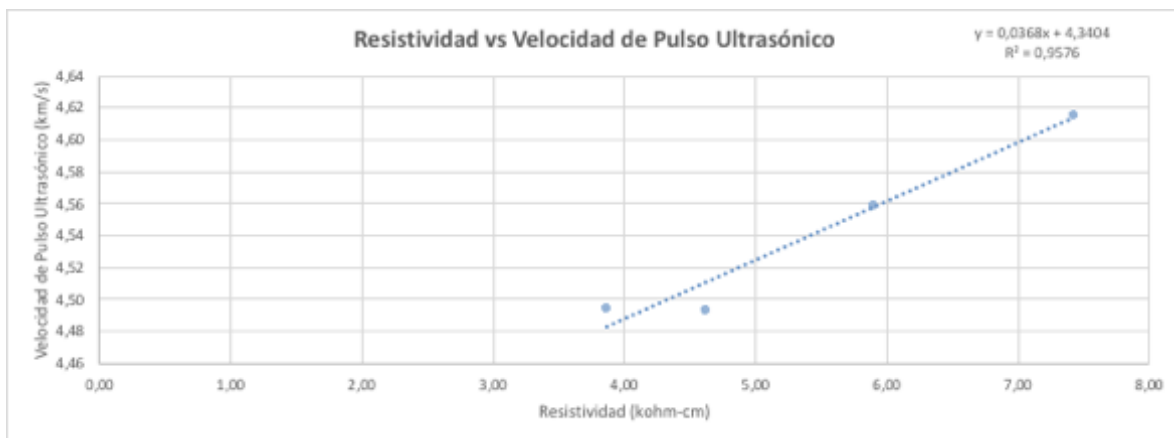


Figura 99 Resistividad vs Velocidad de pulso Ultrasónico para el concreto de 5000 psi.

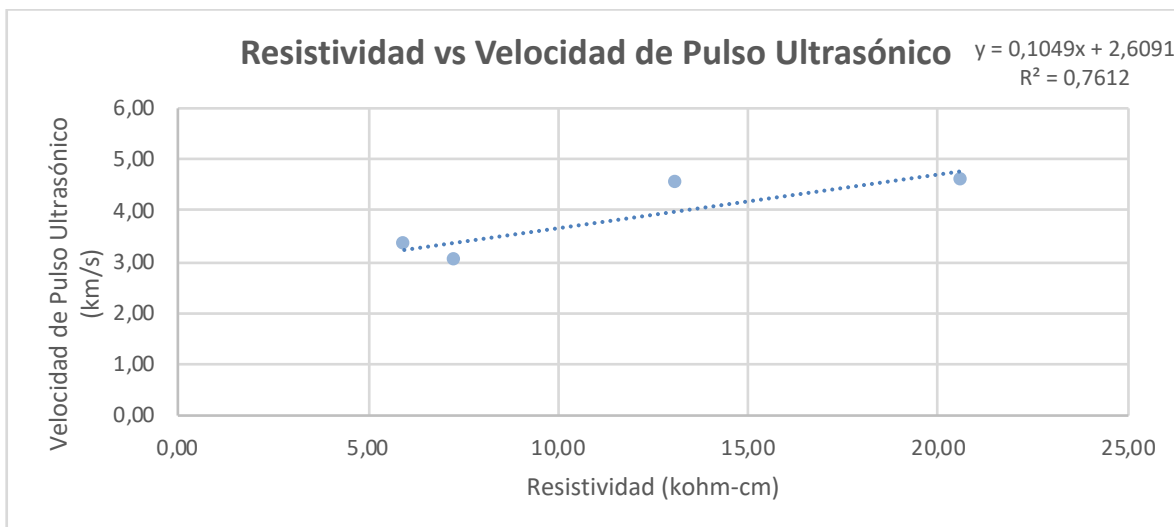


Figura 100 Resistividad vs Velocidad de pulso Ultrasónico para el concreto de 7000 psi.

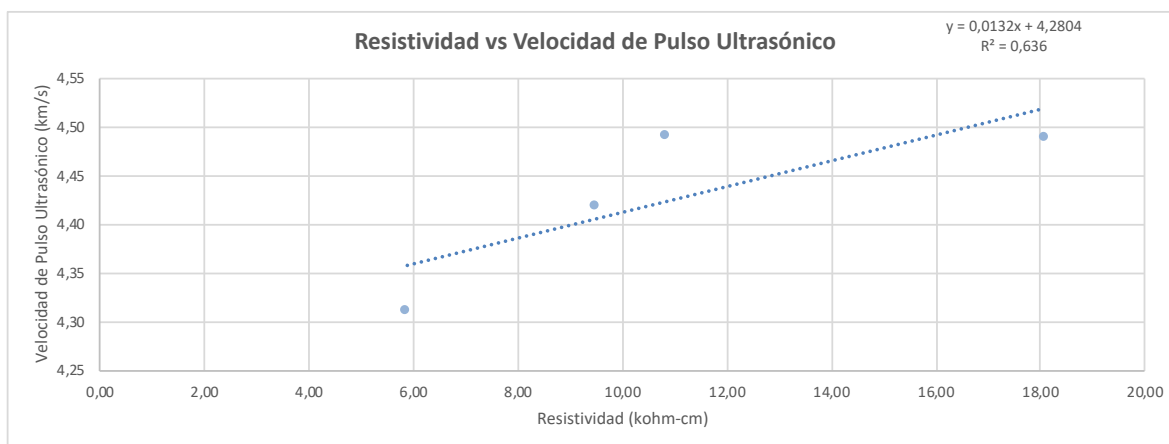


Figura 101 Resistividad vs Velocidad de pulso Ultrasónico para el concreto de 10000 psi.

Sin duda alguna, al evaluar los concretos de distinta resistencia, se obtendrán variaciones en los resultados, debido a las proporciones y tipos de materiales empleados para realizar las mezclas. Sin embargo, la tendencia que encontrada es muy similar, y nos permite corroborar que el comportamiento del concreto a través del tiempo desde el punto de vista de resistencia mecánica, ultrasonido y resistividad se comporta de manera similar en las mezclas de concreto en estudio.

Los valores reportados para concretos con adición de ceniza de cáscara de arroz como material cementante suplementario se empleó para evaluar sus propiedades de resistencia a la compresión, velocidad de pulso ultrasónico y resistividad. Los resultados se muestran en las Tablas 40, 41 y 42) (Chao-Lung et al., 2011).

Tabla 40 Desarrollo de la resistencia a la compresión de un concreto RHA (Chao-Lung et al., 2011).

Mezcla	Relación a/mc	Contenido de Ceniza de cáscara de arroz [%]	Resistencia a la Compresión [MPa]						
			1 día	3 días	7 días	14 días	28 días	56 días	91 días
A23-10	0.23	10	41	59	62	63	66	69	74
A35-00	0.35	0	30	46	50	54	56	60	67
A35-10	0.35	10	27	41	47	52	61	62	67
A35-20	0.35	20	26	38	47	52	60	61	69
A35-30	0.35	30	19	32	43	51	54	60	64
A47-10	0.47	10	16	26	37	40	47	51	56

Tabla 41 Desarrollo de la resistividad de un concreto RHA (Chao-Lung et al., 2011).

Mezcla	Relación a/mc	Contenido de Ceniza de cáscara de arroz [%]	Resistividad Eléctrica [kΩ-cm]						
			1 día	3 días	7 días	14 días	28 días	56 días	91 días
A23-10	0.23	10	4.6	8.3	12.1	15.2	21.3	36.3	37.5
A35-00	0.35	0	6.7	8.1	11.7	12.6	14.1	20.3	22.9
A35-10	0.35	10	5.9	7.6	11.4	14.3	19.6	37.9	40.9
A35-20	0.35	20	4.4	6	10.2	17.6	30.4	58.1	64.1
A35-30	0.35	30	3.7	5.2	11.3	24.4	38.1	65.9	69.1
A47-10	0.47	10	3.3	4.9	7.3	8.4	12	24.5	28.5

Tabla 42 Desarrollo de la velocidad de pulso ultrasónico de un concreto RHA (Chao-Lung et al., 2011).

Mezcla	Relación a/mc	Contenido de Ceniza de cáscara de arroz [%]	Velocidad de onda [m/s]						
			1 día	3 días	7 días	14 días	28 días	56 días	91 días
A23-10	0.23	10	4205	4323	4525	4579	4606	4662	4788
A35-00	0.35	0	4121	4264	4443	4463	4515	4599	4642
A35-10	0.35	10	4146	4265	4436	4456	4530	5499	4637
A35-20	0.35	20	4086	4165	4361	4381	4446	4493	4611
A35-30	0.35	30	4047	4147	4342	4372	4417	4457	4611
A47-10	0.47	10	3795	4059	4237	4332	4452	4541	4579

De acuerdo con los resultados de esta investigación, se compararon con los valores obtenidos en las mezclas del proyecto, y se observa que para las mezclas de 10000 psi (69 MPa), los valores de resistencia a la compresión, ultrasonido y resistividad son similares a los resultados de esta investigación. Indudablemente que los resultados pueden tener muchas variaciones debido a los materiales empleados para cada investigación.

Otra investigación que es referencia en estos ensayos es la realizada por Ulucan ZÇ et al., 2007, donde emplean ceniza volante como adición para concretos de alta resistencia, y resalta la importancia de estos materiales en los concretos adicionados comparándolo con concretos sin adiciones. En la tabla 43 se presentan los resultados asociados a esta investigación.

Tabla 43 Propiedades del concreto a distintas edades (Ulucan ZÇ et. al, 2007)

Mezcla	Concreto con Ceniza volante				Concreto con Humo de Sílice			
	FA25	FA30	FA35	FA40	SF5	SF10	SF15	SF20
Día 3 - Resistencia a la compresión, MPa	27.66	24.11	22.36	20.09	36.15	33.18	30.89	31.26
Día 3 - VPU, km/s	2.683	4.620	4.618	4.532	4.608	4.584	4.425	4.414
Día 7 - Resistencia a la compresión, MPa	30.37	33.57	29.79	27.94	43.93	46.96	40.89	40.44
Día 7 - VPU, km/s	3.695	4.688	4.661	4.598	4.699	4.622	4.625	4.625
Día 28 - Resistencia a la compresión, MPa	49.39	45.11	42.56	45.26	58.04	62.81	67.95	66.35
Día 28 - VPU, km/s	4.918	4.983	4.878	4.808	4.739	4.780	4.685	4.640
Día 130 - Resistencia a la compresión, MPa	53.56	55.24	58.11	59.04	68.04	71.92	73.87	70.53
Día 130 - VPU, km/s	4.934	4.987	4.895	4.891	4.869	4.878	4.815	4.759

En esta investigación, se identifica que a medida que el concreto iba aumentando su período de curado, la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión iban aumentando con el contenido de ceniza volante y humo de Sílice, respectivamente. A partir de estos resultados, este autor elaboró un gráfico donde relaciona el período de curado y la resistencia a la compresión, para poder realizar algunas correlaciones que permitan ajustar los datos a una tendencia exponencial. A continuación, se presentan los gráficos reportados en la literatura:

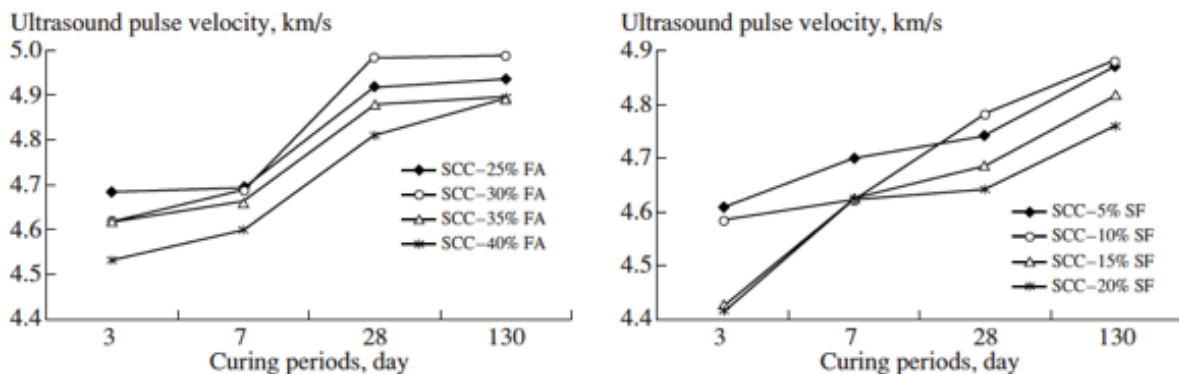


Figura 102 Velocidad de pulso ultrasónico vs período de curado (Ulucan ZÇ et. al, 2007)

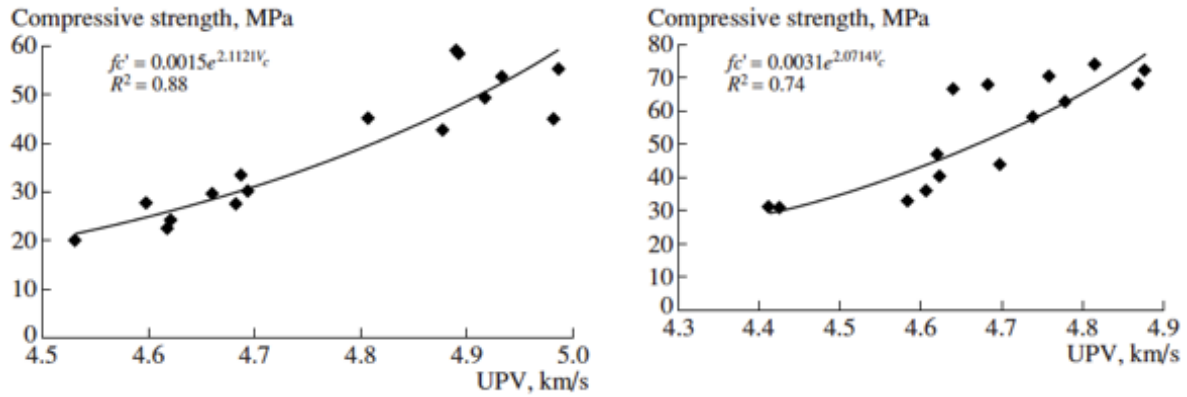


Figura 103 Velocidad de Pulso ultrasónico vs Resistencia a la compresión (Ulucan ZÇ et. al, 2007)

8.1.3 Potencial de corrosión de media celda

De acuerdo a con el ensayos de corrosión natural evaluados en las probetas con acero embebido elaboradas con cada una de las mezclas en estudio en soluciones de cloruros simuladas en el laboratorio, se observa que el concreto de 5000 psi a la edad de 200 días, presenta un severo ataque por corrosión del acero de refuerzo, que se evidencia por la evaluación del potencial y su evolución en el tiempo alcanzando valores ubicados en el riesgo intermedio-alto de corrosión a edades menores de 50 días para mezclas de 5000 psi y 7000 psi. Para el caso de las probetas correspondientes a la mezcla de 10000 psi se identifica un acero aun en estado pasivo en el que no se evidencia corrosión por valores de potencial.

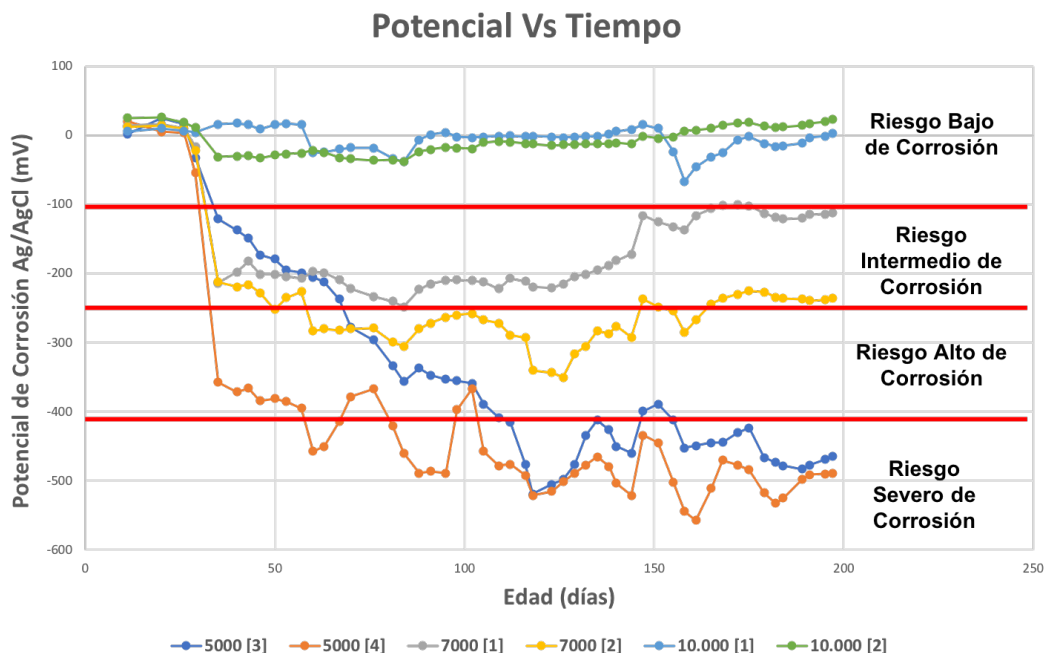


Figura 104 Riesgo de corrosión de los potenciales medidos con el electrodo Ag/AgCl

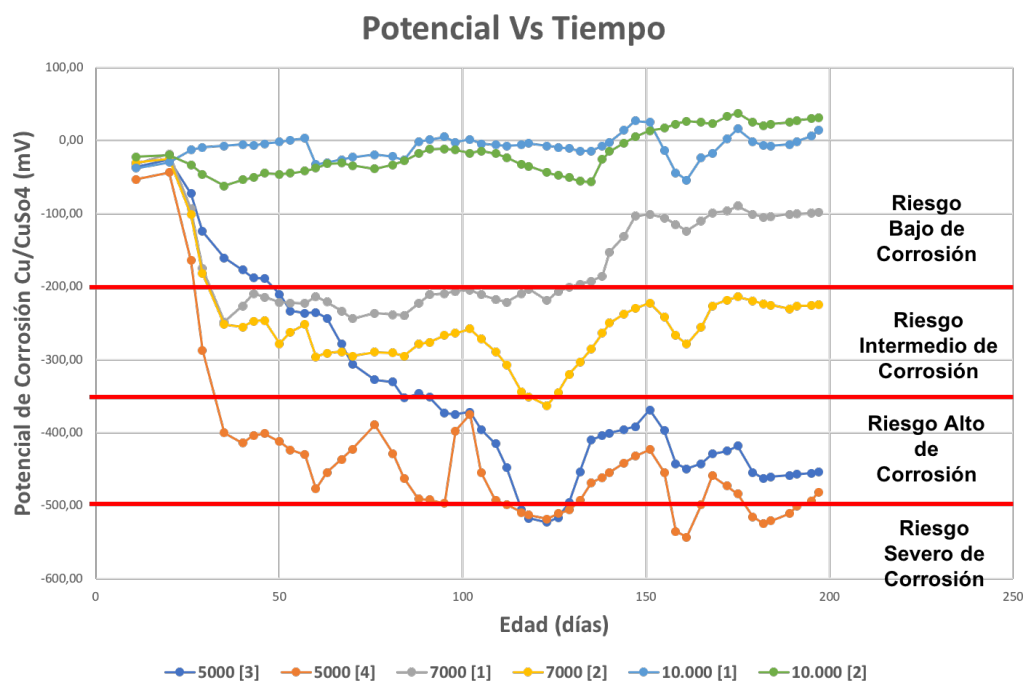


Figura 105 Riesgo de corrosión de los potenciales medidos con el electrodo Cu/CuSO₄

Estos resultados son consistentes con la medición del electrodo de plata/cloruro de plata. Se realizaron mediciones simultáneas con el fin de comprobar con un electrodo alternativo, el estado en el que se encuentran las muestras.

8.1.4 Correlación pérdida de masa vs densidad de corriente

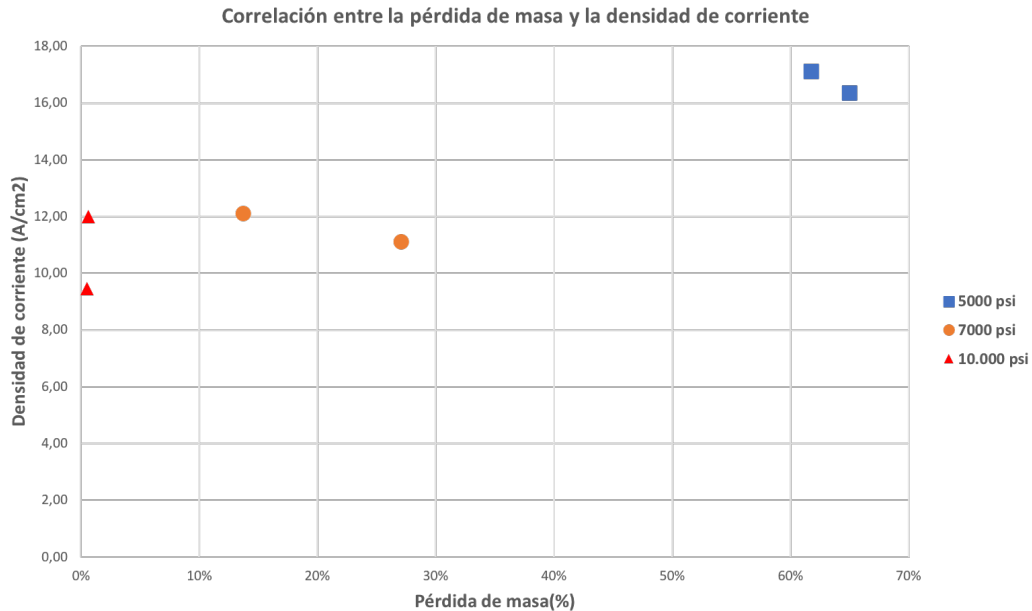


Figura 106 Relación entre la pérdida de masa y la densidad de corriente

En este ensayo se encontró una relación directa entre la pérdida de masa y densidad de corriente. Se encontraron valores altos de densidad de corriente asociados a una alta pérdida de masa durante el ensayo acelerado de corrosión. Se encontraron valores de densidad de corriente entre 16 y 18 A/cm^2 para la mezcla de 5000 psi, lo que muestra una pérdida entre el 60 y 70% de la barra de acero de refuerzo.

8.1.5 Correlación rata de corrosión vs densidad de corriente



Figura 107 Relación entre la rata de corrosión y la densidad de corriente

Es importante relacionar el ensayo electroquímico con el ensayo físico, donde se compara la velocidad de corrosión con la densidad de corriente máxima obtenida en el ensayo acelerado. Es importante resaltar la relación directa que hay entre estos dos parámetros, los cuales mostraron valores con tendencia lineal y creciente asociados a la disminución de la resistencia a la compresión. Para el concreto de 10000 psi se obtuvieron valores de velocidad de corrosión de $100 \mu\text{m/año}$, mientras que para 5000 psi valores cercanos a los $550 \mu\text{m/año}$.

8.1.6 Densidad de corriente

De acuerdo con los resultados obtenidos en el ensayo de espectroscopia de impedancia electroquímica, se obtuvo el valor de la resistencia a la polarización y empleando la ecuación 7, se calculó el valor de la densidad de corriente. De acuerdo con los rangos encontrados en la literatura, Aperador Chaparro et al., 2012, muestra un alto grado de corrosión para la mezclas de 5000 psi. Las mezclas de 7000 psi aún no experimentan un alto grado de corrosión y las mezclas de 10000 psi se encuentran en estado pasivo, todo lo anterior siendo consistentes con los resultados mostrados en las figuras 104 y 105, donde se muestra que empleando otro criterio se llega a la misma conclusión del estado en el que se encuentran las muestras.

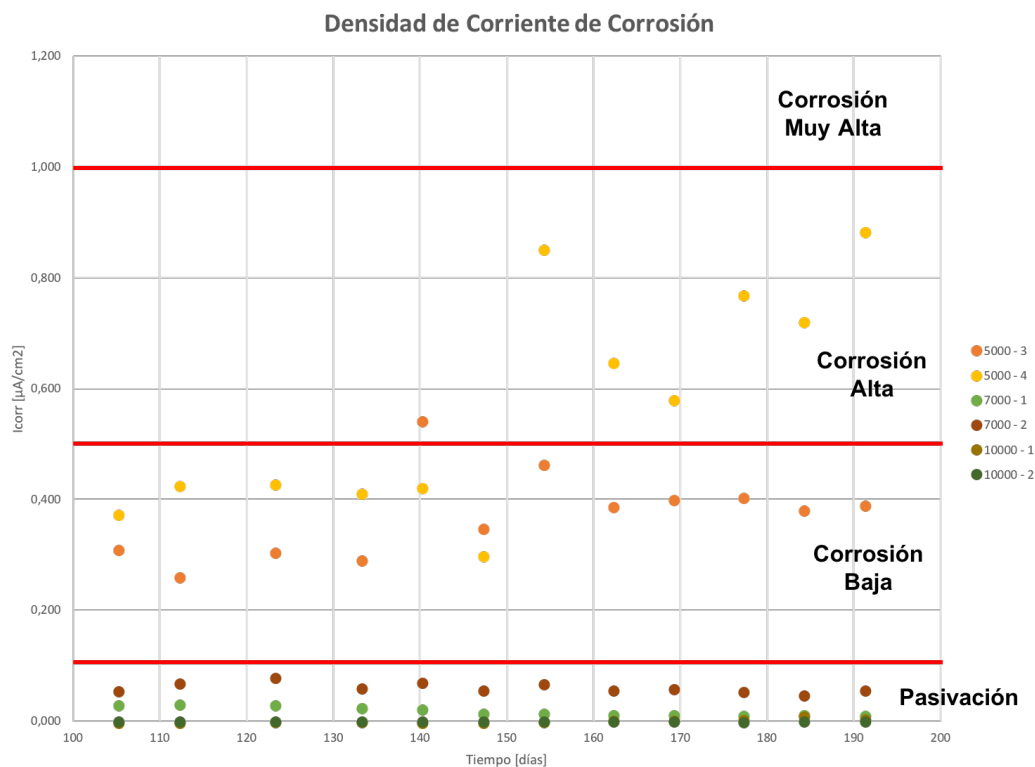


Figura 108 Densidad de corriente calculada del ensayo de espectroscopia de impedancia electroquímica

8.1.7 Difusión del ion cloruro

Para la prueba acelerada de cloruros se realizaron los ajustes respectivos a los resultados encontrados. Este ajuste nos permitió encontrar los parámetros C_s , C_o y D_f que son denominados como concentración en la superficie, concentración inicial y coeficiente de difusión respectivamente a dos edades, 35 y 120 días (Figuras 108, 109 y 110). En estos resultados se identifica que cuando aumenta el período de exposición, disminuye el coeficiente de difusión, esto demuestra que el concreto en el tiempo va mejorando sus propiedades dificultando el transporte de agentes que producen deterioro en el concreto. A continuación, se nota que para la mezcla de 5000 psi se alcanzó entre un 7 y 9% de contenido de cloruros a la edad de 35 días, valor bastante alto en comparación de las mezclas de 7000 y 10000 psi que se observan valores entre 1.4 y 2.2%.

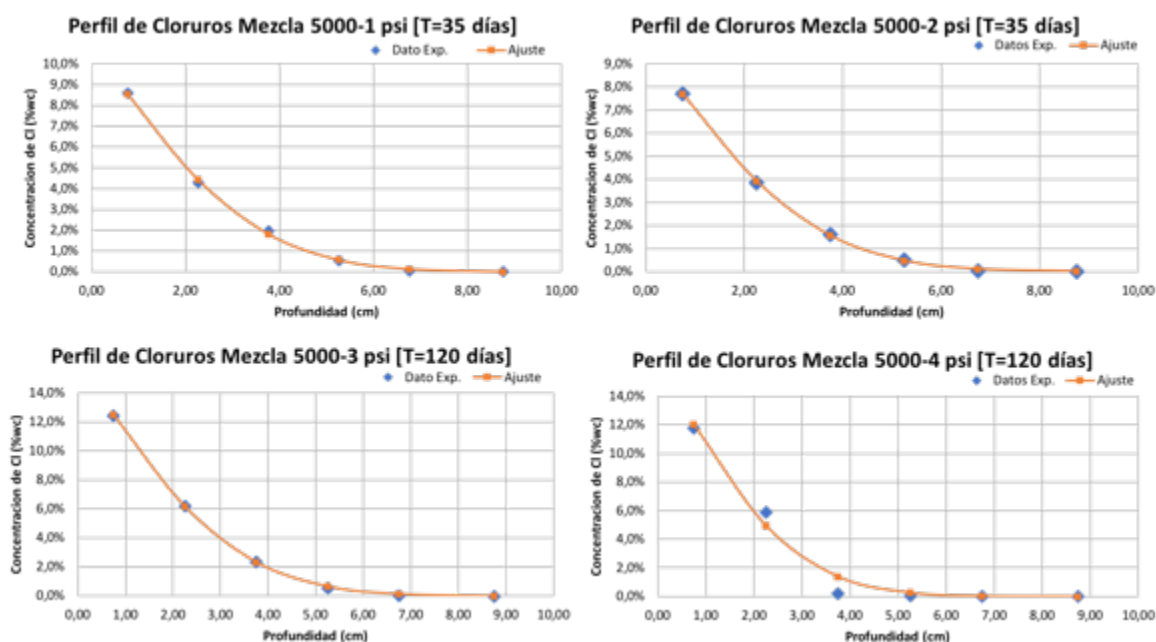


Figura 109 Perfiles de cloruro y su ajuste para la mezcla de 5000 psi con un tiempo de exposición de 35 y 120 días.

Tabla 44 Parámetros del análisis de resultados del ion cloruro a la edad de 35 días

ID	35 días			
	Cs [%*Wc]	Co [%*Wc]	Df [m2/día]	Df [cm2/seg]
5000 - 1	10,95%	0,00%	1,06,E-05	1,22,E-06
5000 - 2	9,92%	0,00%	1,02,E-05	1,18,E-06
7000 - 1	3,54%	0,00%	2,59,E-06	3,00,E-07
7000 - 2	1,90%	0,00%	7,45,E-06	8,63,E-07
10000 - 1	1,23%	0,00%	3,69,E-05	4,27,E-06
10000 - 2	0,77%	0,00%	5,16,E-05	5,97,E-06

De acuerdo con la revisión realizada, se encontraron resultados asociados a concretos de alta resistencia y concretos de resistencia normal, donde se reportan valores de coeficiente de difusión en el orden de $6 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ y $1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ respectivamente para períodos de exposición cercanos a los 18 meses, para nuestro caso, tenemos períodos de exposición de 35 y 120 días, por lo tanto los valores de coeficiente de difusión de nuestros resultados se encuentran en el orden de $1 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$. Se sabe que este parámetro va disminuyendo con el tiempo de curado del concreto, producto del refinamiento de la red de poros en la pasta de cemento (Abbas et al., 2016).

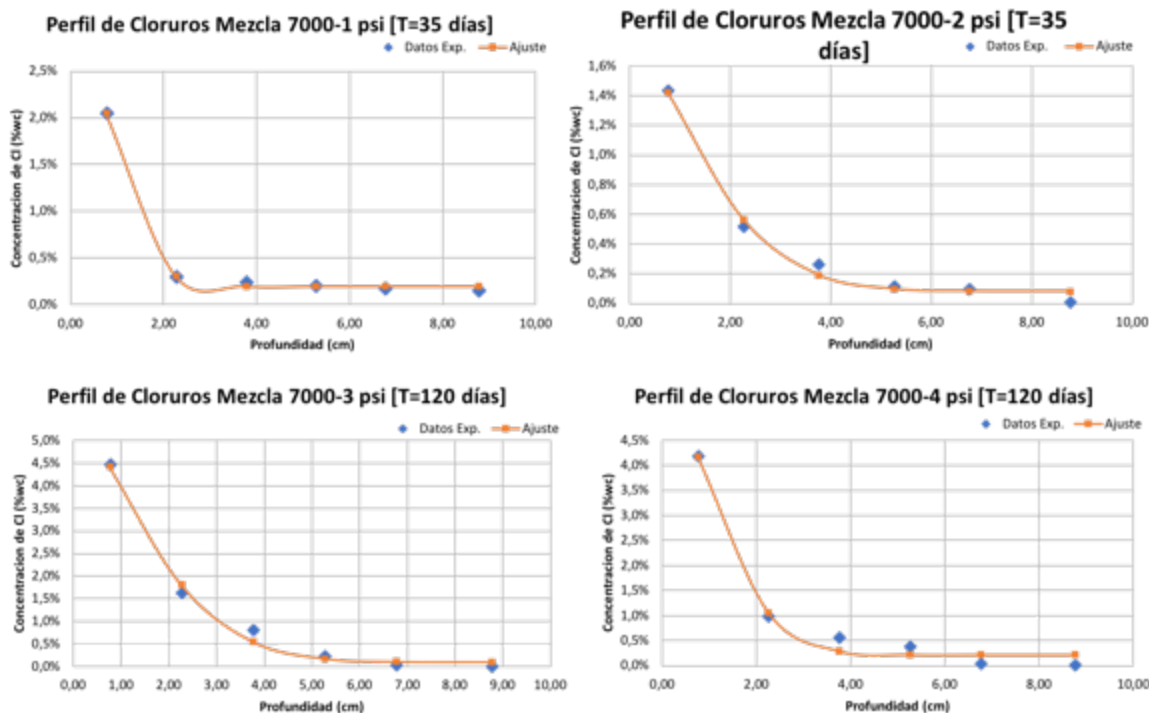


Figura 110 Perfiles de cloruro y su ajuste para la mezcla de 7000 psi con un tiempo de exposición de 35 y 120 días.

Para el período de exposición de 120 días, se encontraron valores en la literatura de coeficiente de difusión alrededor de 8 cm²/año para la mezcla de 5000 psi, además para la mezcla de 7000 psi, se encontraron valores cercanos a los 4.5 cm²/año y para la mezcla de 10000 psi se encontraron valores cercanos a los 7 cm²/año. Después de haber realizado la revisión de literatura, se reportaron valores con los que se caracteriza por durabilidad de concretos de alta resistencia variando la temperatura, además los resultados de los coeficientes de difusión de ion cloruro estimados se encuentra en el orden de 0.8 y 1.1 cm²/año.

Tabla 45 Parámetros del análisis de resultados del ion cloruro a la edad de 120 días

ID	120 días			
	Cs [%*Wc]	Co [%*Wc]	Df [m ² /día]	Df [cm ² /seg]
5000 - 3	16,79%	0,00%	2,75,E-06	3,19,E-07
5000 - 4	16,52%	0,00%	1,97,E-06	2,29,E-07
7000 - 3	3,72%	0,00%	2,06,E-06	2,38,E-07
7000 - 4	1,82%	0,00%	1,19,E-06	1,38,E-07
10000 - 3	3,69%	0,00%	3,99,E-06	4,62,E-07
10000 - 4	2,98%	0,00%	3,51,E-06	4,06,E-07

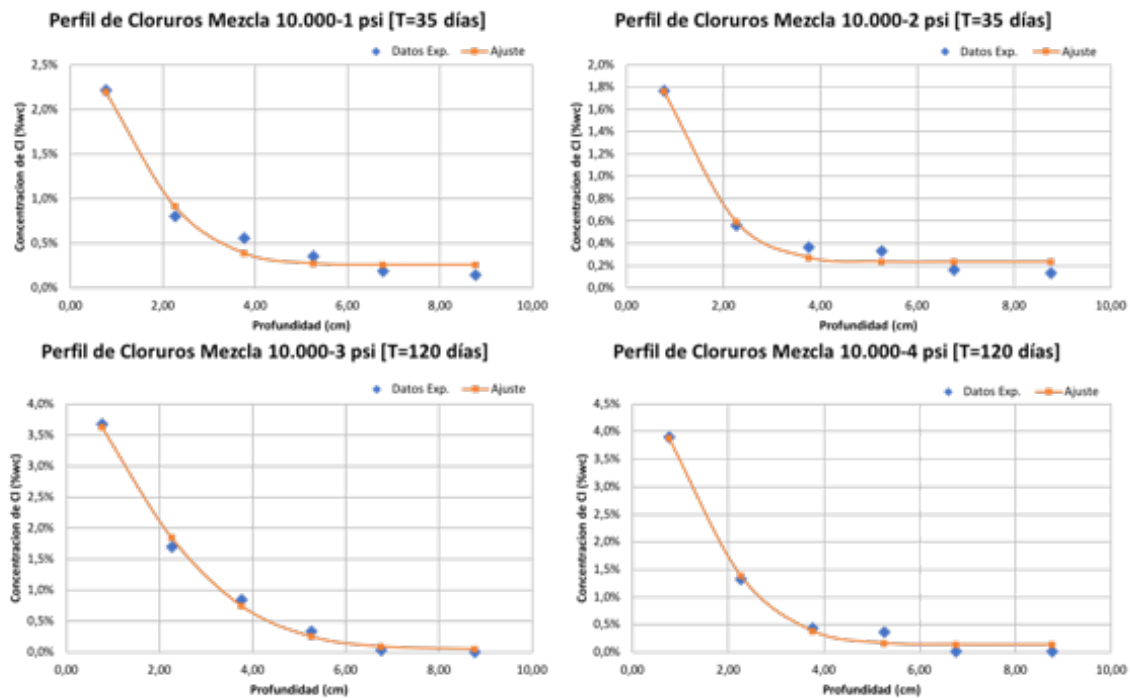


Figura 111 Perfiles de cloruro y su ajuste para la mezcla de 10000 psi con un tiempo de exposición de 35 y 120 días.

8.1.8 Correlación Resistencia a la compresión vs Potencial de corrosión

De acuerdo con los resultados, se observa una clara tendencia en la relación entre la resistencia a la compresión y el potencial de corrosión, donde se muestra que a medida que aumenta la resistencia a la compresión, se observa un aumento en el potencial de la muestra (Figura 111). Esta gráfica se realizó teniendo en cuenta un período de exposición de 200 días aproximadamente, es por ellos que se puede relacionar una ecuación que permita correlacionar la resistencia a la compresión nominal y el potencial de corrosión empleando el período de exposición y empleando el electrodo de referencia de plata/cloruro de plata.

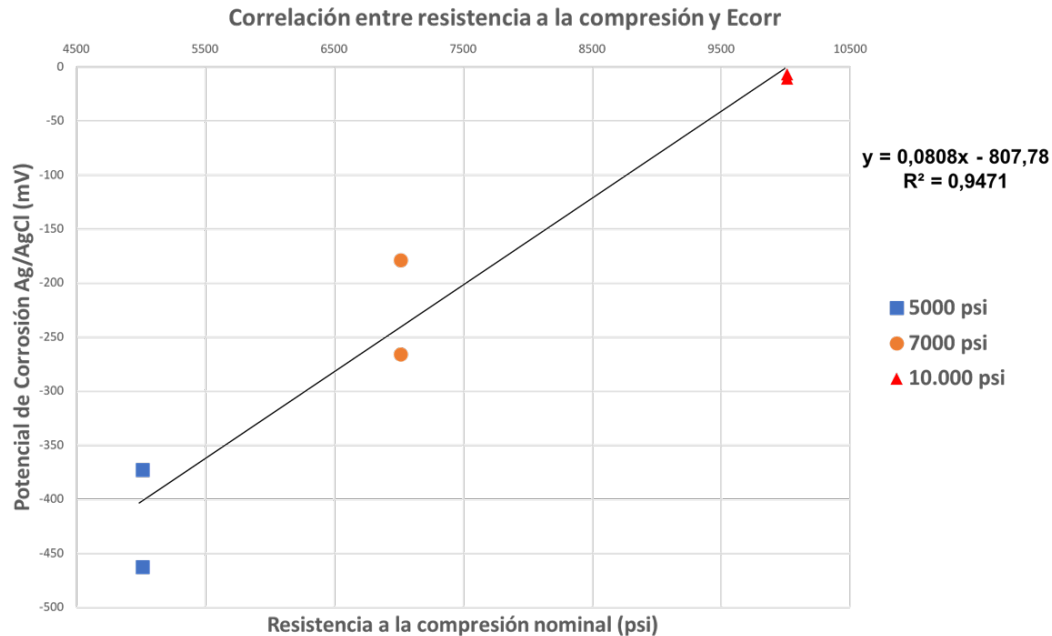


Figura 112 Correlación entre la resistencia a la compresión y el potencial de corrosión

De acuerdo con esta gráfica, la ecuación que relaciona la resistencia a la compresión nominal con el potencial de media celda es:

$$E_{corr} = 0.0808 f'c - 807,78 \text{ [mV]} \quad (21)$$

$f'c \text{ en [psi]}$

La ecuación 21, proviene del ajuste lineal que se le realizaron a los datos experimentales, la cual permite realizar predicciones en laboratorio, de muestras que se encuentra en las mismas condiciones de exposición, lo cual llevaría a una buena aproximación.

8.1.9 Correlación relación agua/material cementante vs coeficiente de difusión

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se observa la tendencia donde aumenta el coeficiente de difusión cuando aumenta la relación agua/material cementante. De acuerdo con los resultados experimentales se realizó un ajuste lineal el cual permite predecir este parámetro, tomando como base la relación a/mc.

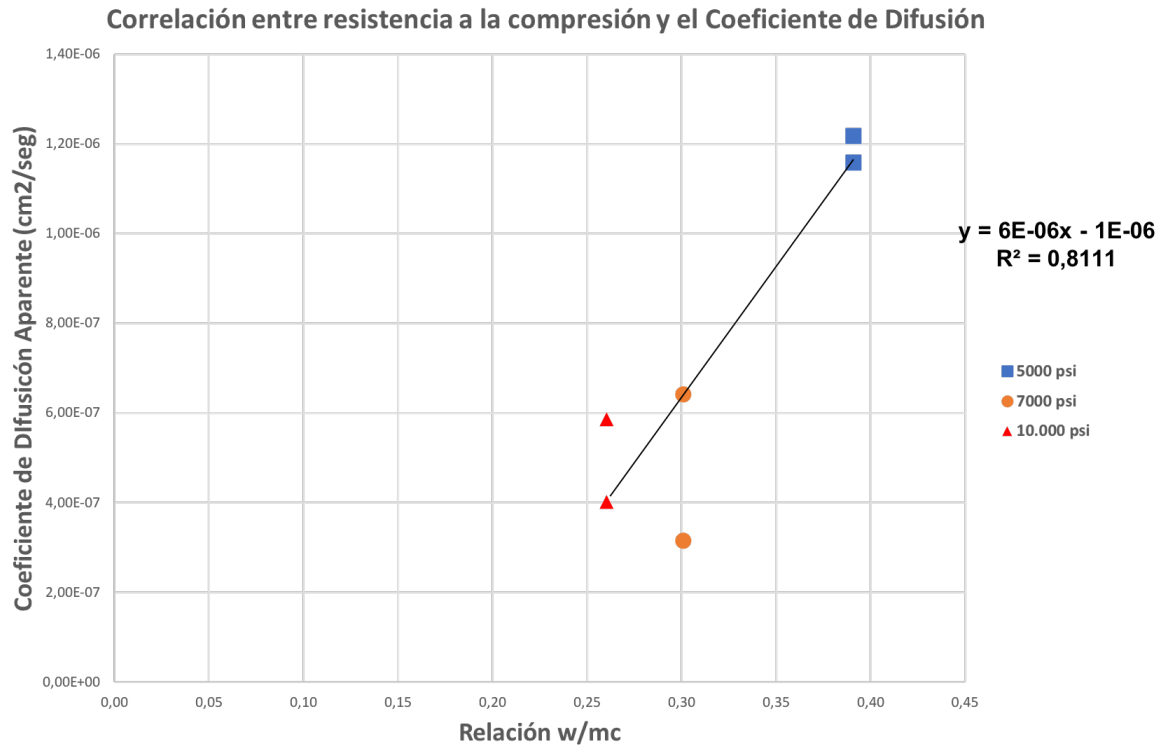


Figura 113 Correlación entre la relación agua/material cementante y el coeficiente de difusión del ion cloruro.

De acuerdo con las investigaciones revisadas, se encuentra una relación entre el coeficiente de difusión y la relación agua/material cementante, incluso haciendo uso de adiciones para estos concretos. A continuación, se muestra un claro ejemplo del comportamiento del coeficiente de difusión ante la variación de la relación a/mc con un período de exposición de 220 días (Arias W, 2014).

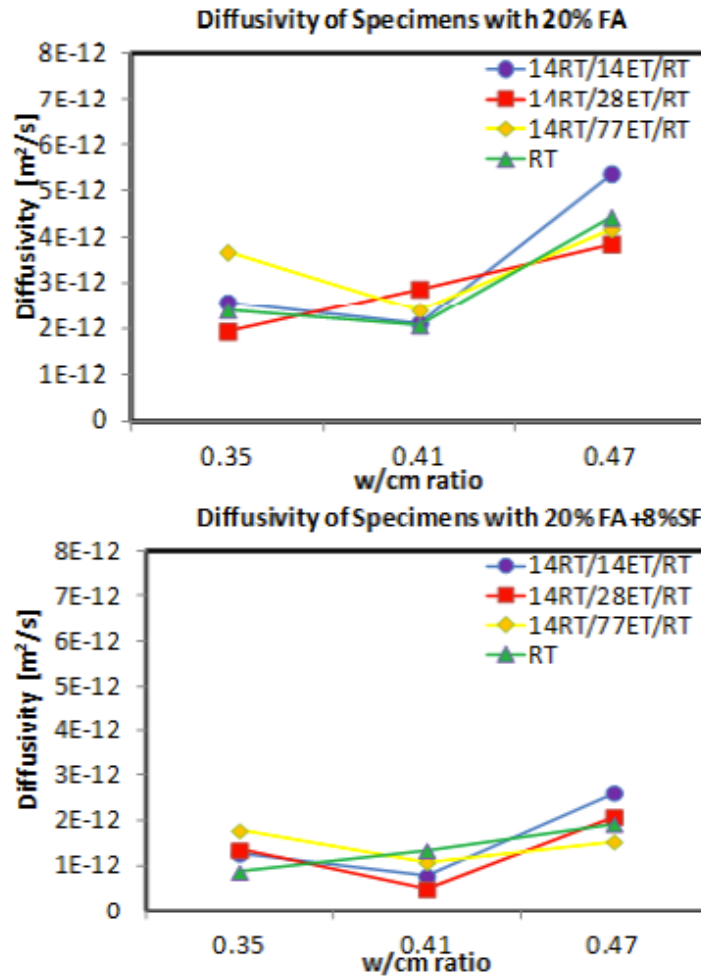


Figura 114 Relación entre w/mc y el coeficiente de difusión (Arias W, 2014).

8.1.10 Correlación Resistencia a la compresión vs Rata de corrosión

De acuerdo con la relación establecida entre la pérdida de masa y la rata de corrosión, se sabe que esta relación viene asociada a la resistencia a la compresión. De acuerdo con los resultados encontrados en la literatura, donde se compara la rata de corrosión de concretos de alta resistencia con concretos ordinarios, se encuentra una reducción de la velocidad de corrosión entre los concretos. A continuación se muestra los resultados de esta investigación (Ismail y Ohtsu, 2006).

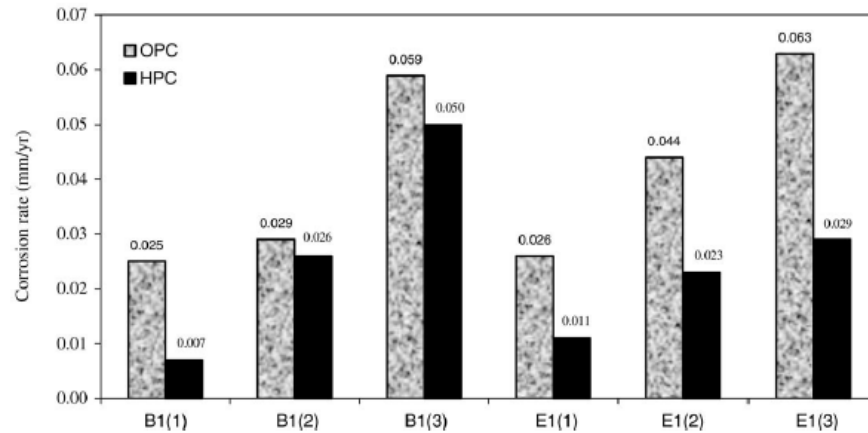


Figura 115 Ratas de corrosión para concretos ordinarios y de alta resistencia bajo condiciones de laboratorio (Ismail y Ohtsu, 2006).

Teniendo en cuenta la relación directa entre la velocidad de corrosión y el tipo de concreto, se estableció un ajuste lineal a los datos experimentales. A continuación, se encuentra el ajuste realizado.

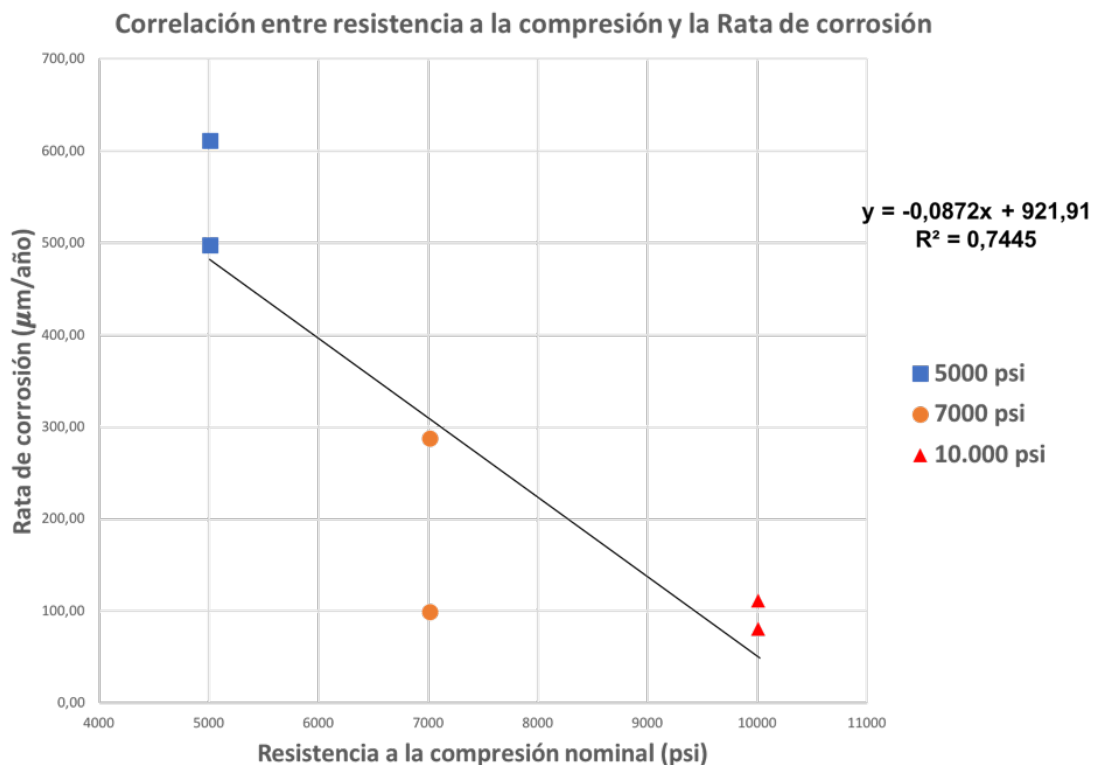


Figura 116 Correlación entre la resistencia a la compresión y rata de corrosión

Como resultado del ajuste realizado, se pueden establecer predicciones teniendo en cuenta el período de exposición y la concentración a la cual fue expuesta la muestra. Teniendo en cuenta lo anterior surge una ecuación(22) producto del ajuste mencionado anteriormente.

$$CR = -0.0872 f'c + 921,91 [\mu m/año] \quad (22)$$

$f'c \text{ en } [psi]$

Con la ecuación 22, se puede tener una buena aproximación de la rata de corrosión teniendo la resistencia a la compresión. Esto ayudará a realizar predicciones del avance de la corrosión haciendo uso de la resistencia nominal a la compresión.

9. CONCLUSIONES

1. Ensayos no destructivos se presentan como alternativa a $f'c$ en la evaluación de las propiedades asociadas a la durabilidad de los concretos y evidencia la evolución en el tiempo.
2. Se encontró una relación directa entre la resistencia a la compresión y los parámetros de durabilidad, de donde resultaron algunos parámetros importantes, como el coeficiente de difusión, la resistividad eléctrica del concreto, la velocidad de corrosión, entre otros, que permitieron comparar en términos durables, las resistencias mecánicas evaluadas.
3. Se encontró que los perfiles de cloruros de cada mezcla evaluada tuvieron concentraciones más altas en los concretos de menor resistencia, al igual que el coeficiente de difusión, que disminuyó en las mezclas para un período de exposición mayor.

4. Para las mezclas evaluadas en el ensayo acelerado de corrosión, se encontró que hubo un aumento significativo del voltaje registrado, a las 90 horas, 200 horas y 550 horas en promedio para las mezclas de 5000, 7000 y 10000 psi respectivamente, produciendo así el agrietamiento visible y evidenciando comportamiento secuencial en las distintas resistencias. Además, las barras de acero se sometieron a un proceso de limpieza donde se evaluó la pérdida de masa dando 63, 20 y 0,6% para los concretos de 5000, 7000 y 10000 psi respectivamente mostrando un mejor comportamiento en la mezcla de mayor resistencia mecánica.
5. Se encontró una relación directa entre el tiempo de exposición y el potencial de media celda medido en los cilindros donde se evidencia para el período de exposición de 200 días, un alto grado de corrosión en las mezclas de 5000 psi mientras que las mezclas de 10000 psi se encontraban en un estado pasivo.
6. Se plantearon una serie de ecuaciones que daban lugar a la tendencia de los resultados a proyectar el comportamiento de la resistencia a la compresión del concreto haciendo relación a distintos parámetros de durabilidad tales como la rata de corrosión, el coeficiente de difusión, resistividad eléctrica y velocidad de pulso ultrasónico, teniendo en cuenta un ambiente de exposición contaminado por cloruros.
7. Se usó el parámetro de resistividad como referencia de medición de la resistencia eléctrica del concreto, además se encontró que este parámetro mejora con el tiempo de curado y también en función de la resistencia a la compresión, mostrando así un aumento entre las mezclas de 5000 y la mezcla de 7000 psi del 100% y entre las mezclas de 7000 y 10000 psi del 25% para los períodos de curado evaluados.
8. Se empleó la medida de velocidad de pulso ultrasónico como parámetro de evaluación de calidad de los concretos estudiados. De acuerdo con los resultados, se obtuvieron buenas calidades de los concretos con valores de velocidad superiores

a 4000 m/s. Adicionalmente, se estableció relación entre este parámetro y la resistencia a la compresión teniendo en cuenta la evolución en el tiempo.

9. Para las mezclas sometidas al ensayo de espectroscopia de impedancia electroquímica se obtuvieron los valores de resistencia a la polarización, dando como resultado valores altos en mezclas de 7000 y 10000 psi en comparación con la mezcla de 5000 psi que arrojó valores muy bajos, los cuales producen altas corrientes de corrosión.
10. Se encontró que, en el ensayo del comportamiento de las mezclas en ambientes de cloruros, se comparó la carga acumulada en la macrocelda de corrosión y se obtuvo que las mezclas de 7000 y 10000 psi se encuentran en estado pasivo, sin embargo, una de muestras de la mezcla de 5000 ha iniciado un proceso de corrosión. Esto muestra el comportamiento de las mezclas de mediana resistencia con respecto a las de alta resistencia.

10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Jalal M, Reza A, Pouladkhan, Norouzi H, Ghobad C. Chloride penetration, water absorption and electrical resistivity of high performance concrete containing nano silica and silica fume. J Am Sci [Internet]. 2012; Disponible en: <http://www.americanscience.org>
- [2] Russell HG, Anderson AR, Banning JO, Cantor IG, Carrasquillo RL, Cook JE, et al. State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete. Chic Comm High-Rise Build. 1977.
- [3] Andrade C, D'Andrea R. La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad. Rev ALCONPAT. 2011;1(2):90–98.
- [4] Tuutti K. Corrosion of steel in concrete. 1982.
- [5] ASTM. (2008). Standard Terminology Relating to Corrosion and Corrosion Testing (ASTM International No. G-15). 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
- [6] Ávila, J., & Genescá, J. (1995). Más allá de la herrumbre (Tercera, Vol. 2). Carretera Picacho-Ajusco 227; 14200 México, D.F.
- [7] Roberge, P. R. (2008). Corrosion Engineering Principles and Practice. McGraw-Hill.
- [8] Smith, W. F., & Hashemi, J. (2006). Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales (Cuarta Edición). McGraw-Hill.
- [9] Youslf, H. A., Al-Hadeethl, F. F., Bashar, A.-N., & Abdelhadi, A. N. (2014). Corrosion of Steel in High-Strength Self-Compacting Concrete Exposed to Saline Environment. International Journal of Corrosion, 2014 (564163), 11.
- [10] Jeenu G, Vinod P, Mangal L. Chloride Ion Penetration of High Strength High Performance Concrete. En IEEE; 2012. p. 124-9.
- [11] Frederiksen JM. CHLORIDE THRESHOLD VALUES FOR SERVICE LIFE DESIGN. En Paris; 2000.
- [12] Jalal M, Reza A, Pouladkhan, Norouzi H, Ghobad C. Chloride penetration, water absorption and electrical resistivity of high performance concrete containing nano silica and silica fume. J Am Sci [Internet]. 2012.
- [13] Khan I. Comparison of Chloride Ion Penetration and Diffusion of High-

Performance Concrete. J Civ Eng. 2012.

- [14] Andrade C, D'Andrea R. La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad. Rev ALCONPAT. 2011;1(2):90–98.
- [15] Howland JJ, Martín AR. Estudio de la absorción capilar y la sorptividad de hormigones con áridos calizos cubanos. Mater Constr. 30 de diciembre de 2013;63(312):515-27.
- [16] Neville, A.; Brooks, J., Tecnología del concreto, Editorial Trillas, México D.F. (1992).
- [17] Poupard O, L'Hostis V, Catinaud S, Petre-Lazar I. Corrosion damage diagnosis of a reinforced concrete beam after 40 years natural exposure in marine environment. Cem Concr Res. Marzo de 2006;36(3):504-20.
- [18] Roberto Capozucca. Damage to reinforced concrete due to reinforcement corrosion. 7 March 1995.
- [19] Bhuiyan S, Law DW, Nicholls P, Christodoulou C. Investigation of the residual protection of steel following application of protective current. Constr Build Mater. Febrero de 2018;162:503-11.
- [20] Wilson K, Jawed M, Ngala V. The selection and use of cathodic protection systems for the repair of reinforced concrete structures. Constr Build Mater. Febrero de 2013;39:19-25.
- [21] Shi X, Xie N, Fortune K, Gong J. Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview. Constr Build Mater. Mayo de 2012;30:125-38.
- [22] Elahi A, Basheer PAM, Nanukuttan SV, Khan QUZ. Mechanical and durability properties of high performance concretes containing supplementary cementitious materials. Constr Build Mater. Marzo de 2010;24(3):292-9.
- [23] Aperador Chaparro W, Vera Lopez E, Mejia De Gutierrez R. Corrosion behavior of steel bar embedded in alkali-activated slag concrete subjected to carbonation and chloride attack. Dyna. 2012;79(171):80–87.
- [24] Singh N, Singh SP. Evaluating the performance of self-compacting concretes made with recycled coarse and fine aggregates using nondestructive testing

- techniques. *Constr Build Mater.* Agosto de 2018;181:73-84.
- [25] Malek J, Kaouther M. Destructive and non-destructive testing of concrete structures. *Jordan J Civ Eng.* 2014;8(4):432–441.
- [26] Hwang E, Kim G, Choe G, Yoon M, Gucunski N, Nam J. Evaluation of concrete degradation depending on heating conditions by ultrasonic pulse velocity. *Constr Build Mater.* Mayo de 2018;171:511-20.
- [27] Saint-Pierre F, Philibert A, Giroux B, Rivard P. Concrete Quality Designation based on Ultrasonic Pulse Velocity. *Constr Build Mater.* Octubre de 2016;125:1022-7.
- [28] Andrade C, Alonso C. Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. *Mater Struct.* 2004;37(9):623–643.
- [29] Abbas S, Nehdi ML, Saleem MA. Ultra-High Performance Concrete: Mechanical Performance, Durability, Sustainability and Implementation Challenges. *Int J Concr Struct Mater.* Septiembre de 2016;10(3):271-95.
- [30] Ismail M, Ohtsu M. Corrosion rate of ordinary and high-performance concrete subjected to chloride attack by AC impedance spectroscopy. *Constr Build Mater.* Septiembre de 2006;20(7):458-69.
- [31] Arias W. Bulk Diffusion of High Performance Concrete Specimens Exposed To Different Levels of Sodium Chloride and Seawater. 2014
- [32] Ranjith A, Balaji Rao K, Manjunath K. Evaluating the effect of corrosion on service life prediction of RC structures – A parametric study. *Int J Sustain Built Environ.* Diciembre de 2016;5(2):587-603.
- [33] ASTM. (2008). Standard Terminology Relating to Corrosion and Corrosion Testing (ASTM International No. G-15). 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
- [34] Ávila, J., & Genescá, J. (1995). Más allá de la herrumbre (Tercera, Vol. 2). Carretera Picacho-Ajusco 227; 14200 México, D.F.
- [35] Roberge, P. R. (2008). Corrosion Engineering Principles and Practice.

McGraw-Hill.

- [36] Smith, W. F., & Hashemi, J. (2006). Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales (Cuarta Edición). McGraw-Hill.
- [37] Youslf, H. A., Al-Hadeethl, F. F., Bashar, A.-N., & Abdelhadi, A. N. (2014). Corrosion of Steel in High-Strength Self-Compacting Concrete Exposed to Saline Environment. *International Journal of Corrosion*, 2014(564163), 11.
- [38] Moreno A., López T., Martínez M. El Fenómeno De La Corrosión En Estructuras De Concreto Reforzado. Publicación Técnica No. 182 Sanfandila, Qro, 2001.
- [39] Babaee M, Castel A. Chloride diffusivity, chloride threshold, and corrosion initiation in reinforced alkali-activated mortars: Role of calcium, alkali, and silicate content. *Cem Concr Res* [Internet]. Junio de 2018 [citado 11 de julio de 2018]; Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884617309912>.
- [40] Thomas MD, Bamforth PB. Modelling chloride diffusion in concrete: effect of fly ash and slag. *Cem Concr Res*. 1999;29(4):487–495.
- [41] Ann KY, Song H-W. Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete. *Corros Sci*. Noviembre de 2007;49(11):4113-33.
- [42] Aguirre-Guerrero AM, Mejía-de-Gutiérrez R, Montês-Correia MJR. Corrosion performance of blended concretes exposed to different aggressive environments. *Constr Build Mater*. Septiembre de 2016;121:704-16.
- [43] Howland JJ, Martín AR. Estudio de la absorción capilar y la sorptividad de hormigones con áridos calizos cubanos. *Mater Constr*. Diciembre de 2013;63(312):515-27.
- [44] Yu H, Shi X, Hartt WH, Lu B. Laboratory investigation of reinforcement corrosion initiation and chloride threshold content for self-compacting concrete. *Cem Concr Res*. Octubre de 2010;40(10):1507-16.
- [45] Aguirre-Guerrero AM, Mejía-de-Gutiérrez R, Montês-Correia MJR. Corrosion performance of blended concretes exposed to different aggressive environments. *Constr Build Mater*. Septiembre de 2016;121:704-16.

- [46] Azarsa P, Gupta R. Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: A Review. *Adv Mater Sci Eng.* 2017;2017:1-30.
- [47] 2. Layssi H, Ghods P, Alizadeh AR, Salehi M. Electrical resistivity of concrete. *Concr Int.* 2015;37(5):41–46.